

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-074697

(43)Date of publication of application : 14.03.2000

(51)Int.Cl. G01D 5/26  
G01B 11/16  
G01K 11/12  
G01L 1/24

(21)Application number : 11-150618 (71)Applicant : MITSUBISHI ELECTRIC CORP

(22)Date of filing : 28.05.1999 (72)Inventor : RI KINZO  
TAKADA SHIRO  
MIYAZAKI MASAYUKI

(30)Priority

Priority number : 10173688 Priority date : 19.06.1998 Priority country : JP  
10173690 19.06.1998

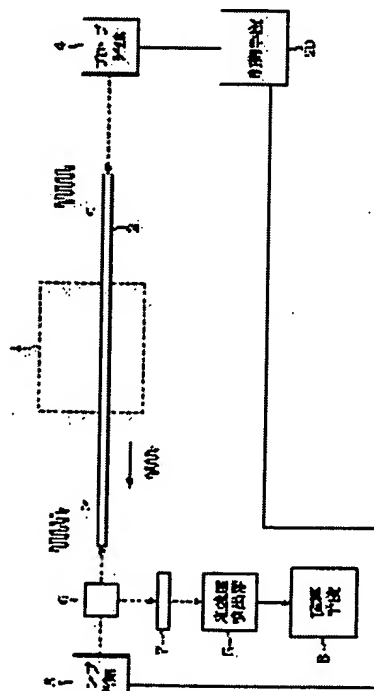
JP

## (54) MEASURING EQUIPMENT

(57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To provide an equipment for measuring strain or temperature of an object with fine spatial resolution.

**SOLUTION:** The measuring equipment employs discontinuous probe light and the measuring section of an optical fiber 2 is divided equally into m microsections. An operating means 8 operates the scattering gain coefficient of each microsection from an intensity of light detected by a light intensity detector 5 at a specified sampling rate according to a gain operating matrix and then operates the frequency shift of scattering light for each microsection. Subsequently, the operating means 8 operates the strain and/or temperature for each



**BEST AVAILABLE COPY**

microsection based on the frequency shift and/or scattering light intensity.

---

## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 14.09.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3524431

[Date of registration] 20.02.2004

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-74697

(P2000-74697A)

(43) 公開日 平成12年3月14日 (2000.3.14)

(51)Int.Cl.	識別記号	P I	チーコード(参考)
G 0 1 D 5/26		G 0 1 D 5/26	D
G 0 1 B 11/16		G 0 1 B 11/16	Z
G 0 1 K 11/12		G 0 1 K 11/12	F
G 0 1 L 1/24		G 0 1 L 1/24	A

審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全 26 頁)

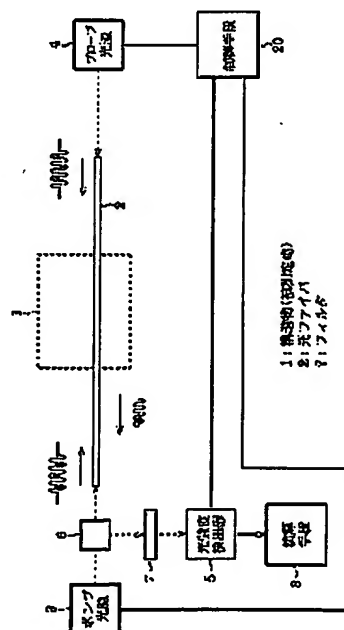
(21) 出願番号	特願平11-150618	(71) 出願人	000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号
(22) 出願日	平成11年5月28日 (1999.5.28)	(72) 発明者	幸 欣増 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三 菱電機株式会社内
(31) 優先権主張番号	特願平10-173688	(72) 発明者	高田 志郎 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三 菱電機株式会社内
(32) 優先日	平成10年6月19日 (1998.6.19)	(72) 発明者	宮崎 政行 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三 菱電機株式会社内
(33) 優先権主張国	日本 (J P)	(74) 代理人	100068474 弁理士 田澤 博昭 (外1名)
(31) 優先権主張番号	特願平10-173680		
(32) 優先日	平成10年6月19日 (1998.6.19)		
(33) 優先権主張国	日本 (J P)		

(54) 【発明の名称】 測定装置

(57) 【要約】

【課題】 光ファイバ2の特性やブリルアン散乱光のバンド幅などの制約に起因して、空間分解能を一定値以上に上げることができなかった。

【解決手段】 ブロープ光を不連続ブロープ光とした測定装置である。さらに、光ファイバ2の測定区間をm個の微小区間に等分割するとともに、消費手段8は、光強度検出器5により所定のサンプリング周期で検出した光強度から利得消費行列式に基づいて各微小区間の散乱利得係数を演算して各微小区間に関する散乱光の周波数シフトを演算し、更に、この周波数シフト及び/又は散乱光強度に基づき各微小区間の歪み及び/又は温度を演算する。



(2)

特開2000-74697

1

2

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 被測定物に固定される光ファイバと、上記光ファイバに不連続ポンプ光を入射するポンプ光源と、上記光ファイバに不連続プローブ光を入射するプローブ光源と、上記不連続プローブ光の周波数を設定するとともに所定の周波数範囲で上記不連続プローブ光の周波数を掃引する制御手段と、上記光ファイバから出力される出力光の光強度を検出する光強度検出器と、上記光強度検出器への上記出力光の光路に配設され、この出力光に含まれる散乱光を透過するフィルタと、上記光強度検出器で検出されたものであり、上記制御手段により掃引された周波数範囲の散乱光強度に基づいて上記光ファイバの測定区間の所定の区間の歪み及び／又は温度を演算する演算手段とを備えた測定装置。

【請求項2】 光強度検出器は、測定区間を等分割して得られる複数の微小区間の各長さの2倍に相当する所定の時間間隔で散乱光の光強度を計測し、演算手段は、上記光強度検出器で検出された光強度に基づいて上記光フ

\*ファイバの測定区間の各微小区間の歪み及び／又は温度を演算することを特徴とする請求項1記載の測定装置。

【請求項3】 光ファイバの測定区間をm個の微小区間に等分割し、ポンプ光源は各微小区間の長さの2倍に相当する所定の時間間隔のn倍に相当する継続時間即ち幅を有する不連続ポンプ光を上記光ファイバへ入射し、演算手段は、光強度検出器により上記所定の時間間隔で検出された、不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における散乱光強度から下記式1に従って上記各微小区間の散乱利得係数を演算し、不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ が掃引された所定の周波数範囲について演算された散乱利得係数に基づいて上記各微小区間に関する散乱光の周波数シフトを演算し、更に、散乱光の周波数シフト及び／又は散乱光強度に基づき上記各微小区間の歪み及び／又は温度を演算することを特徴とする請求項2記載の測定装置。

【数1】

$$\begin{pmatrix} a(1,1) & a(1,2) & \cdots & a(1,n) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a(2,2) & a(2,3) & \cdots & a(2,n+1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & \vdots \\ 0 & \cdots & a(i,j) & a(i,j+1) & \cdots & a(i,i+n-1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & a(m,m) & a(m,m+1) & \cdots & a(m,m+n-1) & \cdots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_s(1) \\ g_s(2) \\ \vdots \\ g_s(i) \\ \vdots \\ g_s(m) \\ \vdots \\ g_s(m+n-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_s(1) \\ Q_s(2) \\ \vdots \\ Q_s(i) \\ \vdots \\ Q_s(m) \\ \vdots \\ Q_s(m+n-1) \end{pmatrix}$$

……式1

但し、 $Q_s(i)$  ( $i=1 \sim m$ ) は、少なくとも、上記不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における、上記測定区間の一端部に最も近い微小区間から数えて、i番目から  $(i+n-1)$  番目の微小区間に関する散乱光強度と上記光ファイバに入射した不連続プローブ光強度とによって決まる変数であり、 $g_s(i)$  は、上記不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における、上記i番目の微小区間の散乱利得係数であり、 $a(i,j)$  は $Q_s(i)$  に対するj番目の微小区間に関する散乱光の光強度の割合を示す寄与率である。

【請求項4】 被測定物に固定され、それぞれ所定の長さを有するm個の微小区間に等分割された測定区間を有する光ファイバと、上記光ファイバに不連続ポンプ光を入射するポンプ光源と、上記光ファイバに不連続プローブ光を入射するプローブ光源と、上記不連続プローブ光の周波数を設定するとともに所定の周波数範囲で上記不連続プローブ光の周波数を掃引する制御手段と、

上記光ファイバから出力される出力光の光強度を検出する光強度検出器と、上記光強度検出器への上記出力光の光路に配設され、この出力光に含まれる散乱光を透過するフィルタと、

上記光強度検出器で検出された光強度に基づいて上記光ファイバの上記測定区間の歪み及び／又は温度分布を演算する演算手段とを備えており、

上記ポンプ光源は、上記制御手段による制御のもとで、各不連続プローブ光に対して、各微小区間の長さの2倍に相当する所定の時間間隔のn倍に相当する継続時間即ち幅を有する不連続ポンプ光を上記光ファイバへ入射し、

上記プローブ光源は、上記制御手段により設定された上記不連続プローブ光の設定周波数毎に、上記所定の時間間隔を単位に所定の継続時間即ち幅を有する不連続光を分割して得られる、それぞれ一連の複数のパルス光から成る、少なくとも2つの不連続プローブ光のそれぞれと不連続ポンプ光とを上記光ファイバの所定の場所で開催うように上記制御手段による制御のもとで順次上記光ファイバに入射し、

(3)

特開2000-74697

3

4

上記演算手段は、上記光強度検出器により検出された不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における散乱光強度から下記式2に従って上記各微小区間の散乱利得係数を演算し、不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ が掃引された所定の周波数範囲について演算された散乱利得係数に基

\*ついて上記各微小区間に関する散乱光の周波数シフトを演算し、更に、散乱光の周波数シフト及び/又は散乱光強度に基づき上記各微小区間の歪み及び/又は温度を演算する測定装置。

【数2】

$$\begin{pmatrix} a(1,1) & a(1,2) & \cdots & a(1,n) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a(2,2) & a(2,3) & \cdots & a(2,n+1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & a(i,j) & a(i,i+1) & \cdots & a(i,i+n-1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & a(m,m) & a(m,m+1) & \cdots & a(m,m+n-1) & \cdots & \cdots & \cdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_s(1) \\ g_s(2) \\ \vdots \\ g_s(i) \\ \vdots \\ g_s(m) \\ \vdots \\ g_s(m+n-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_s(1) \\ Q_s(2) \\ \vdots \\ Q_s(i) \\ \vdots \\ Q_s(m) \\ \vdots \\ Q_s(m+n-1) \end{pmatrix}$$

……式2

但し、 $Q_s(i)$  ( $i=1 \sim m$ ) は、少なくとも、上記不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における、上記測定区間の一端部に最も近い微小区間から数えて、 $i$ 番目から ( $i+n-1$ ) 番目の微小区間に関する散乱光強度と上記光ファイバに入射した不連続プローブ光強度とによって決まる変数であり、 $g_s(i)$  は、上記不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における、上記  $i$  番目の微小区間の散乱利得係数であり、 $a(i, j)$  は  $Q_s(i)$  に対する  $j$  番目の微小区間に関する散乱光強度の割合を示す寄与率である。

【請求項5】 被測定物に固定され、それぞれ所定の長さを有する  $m$  個の微小区間に等分割された測定区間を有する光ファイバと、

上記光ファイバに不連続ポンプ光を入射するポンプ光源と、

上記光ファイバに不連続プローブ光を入射するプローブ光源と、

上記不連続プローブ光の周波数を設定するとともに所定の周波数範囲で上記不連続プローブ光の周波数を掃引する制御手段と、

上記光ファイバから出力される出力光の光強度を検出する光強度検出器と、上記光強度検出器への上記出力光の光路に配設され、この出力光に含まれる散乱光を透過するフィルタと、

上記光強度検出器で検出された光強度に基づいて上記光ファイバの上記測定区間の歪み及び/又は温度分布を演

算する演算手段とを備えており、

上記ポンプ光源は、上記制御手段による制御のもとで、各不連続プローブ光に対して、各微小区間の長さの2倍に相当する所定の時間間隔の  $n$  倍に相当する継続時間即ち幅を有する不連続ポンプ光を上記光ファイバへ入射し、

上記プローブ光源は、上記制御手段により設定された上記不連続プローブ光の設定周波数毎に、上記所定の時間間隔に等しい所定のパルス繰り返し周期を有する一連の複数のパルス光を上記光ファイバに入射するか、又は、この一連の複数のパルス光を分割して得られる、それぞれ一連の複数のパルス光から成る、少なくとも2つの不連続プローブ光を順次入射し、各不連続プローブ光と不連続ポンプ光とを上記光ファイバの所定の場所で重なるように上記制御手段による制御のもとで順次上記光ファイバに入射し、

上記演算手段は、光強度検出器により所定のサンプリング周期で検出された光強度から下記式3に従って上記各微小区間の散乱利得係数を演算し、不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ が掃引された所定の周波数範囲について演算された散乱利得係数に基づいて上記各微小区間に関する散乱光の周波数シフトを演算し、更に、散乱光の周波数シフト及び/又は散乱光強度に基づき上記各微小区間の歪み及び/又は温度を演算する測定装置。

【数3】

(4)

特開2000-74697

5

5

$$\begin{pmatrix} a(1,1) & a(1,2) & \cdots & a(1,n) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a(2,2) & a(2,3) & \cdots & a(2,n+1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & a(i,i) & a(i,i+1) & \cdots & a(i,i+n-1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & a(m,m) & a(m,m+1) & \cdots & a(m,m+n-1) & \cdots & \cdots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_s(1) \\ g_s(2) \\ \vdots \\ g_s(i) \\ \vdots \\ g_s(m) \\ \vdots \\ g_s(m+n-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_s(1) \\ Q_s(2) \\ \vdots \\ Q_s(i) \\ \vdots \\ Q_s(m) \\ \vdots \\ Q_s(m+n-1) \end{pmatrix}$$

……式3

但し、 $Q_s(i)$  ( $i=1 \sim m$ ) は、少なくとも、上記不連続プローブ光の設定周波数  $\nu_s$  における、上記測定区間の一端部に最も近い微小区間から数えて、 $i$  番目から  $(i+n-1)$  番目の微小区間に関する散乱光強度と上記光ファイバに入射した不連続プローブ光強度とによって決まる変数であり、 $g_s(i)$  は、上記不連続プローブ光の設定周波数  $\nu_s$  における、上記  $i$  番目の微小区間の散乱利得係数であり、 $a(i, j)$  は  $Q_s(i)$  に対する  $j$  番目の微小区間に関する散乱光の光強度の割合を示す寄与率である。

【請求項6】 各不連続プローブ光に含まれる複数のパルス光は、一定の繰返し周期を有することを特徴とする請求項4または請求項5記載の測定装置。

【請求項7】 各不連続プローブ光に含まれる複数のパルス光は、所定のコードに対応した必ずしも一定ではない周期で断続的に連なるものであることを特徴とする請求項4または請求項5記載の測定装置。

【請求項8】 ポンプ光源は光ファイバの一端から不連続ポンプ光を入射し、プローブ光源は上記光ファイバの他端から不連続プローブ光を入射し、光強度検出器は上記光ファイバの上記一端から出力される出力光の光強度を検出し、演算手段は、下記式4に従って、不連続プローブ光の光ファイバ中での減衰量を考慮して、変数  $Q_s(i)$  を求めることを特徴とする請求項3から請求項7のうちのいずれか一項記載の測定装置。

【数4】

$$Q_s(i) = Q_n \left\{ \frac{P_k(t, 0)}{P_s(t-L/c, L)} \right\} + \alpha_s L \quad \text{……式4}$$

但し、 $P_s(t, 0)$  は上記光強度検出器により上記光ファイバの上記一端で時刻  $t$  に検出された散乱光強度であり、 $P_s(t-L/c, L)$  は上記光ファイバの上記他端で時刻  $(t-L/c)$  に検出されたプローブ光強度\*

$$\begin{pmatrix} \Delta V \\ \Delta P_s \\ P_k(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{EV} & C_{TV} \\ C_{EP} & C_{TP} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad \text{……式6}$$

\*であり、 $\alpha_s$  は上記不連続プローブ光の減衰係数であり、 $L$  は上記光ファイバの全長であり、 $c$  は上記光ファイバ中での上記不連続プローブ光の伝播速度である。

【請求項9】 散乱利得係数  $g_s(m+1)$  から  $g_s(m+n-1)$  (又は  $g_s(1)$  から  $g_s(n-1)$ ) に関する、光ファイバの被測定物に固定されていない部位である参照ファイバ部の温度を測定する温度測定手段を備えており、演算手段は、上記測定温度に基づき  $g_s(m+1)$  から  $g_s(m+n-1)$  (又は  $g_s(1)$  から  $g_s(n-1)$ ) までの散乱利得係数を演算した後、式1 (又は式2 若しくは式3) に基づいて各微小区間の散乱利得係数を演算することを特徴とする請求項3から請求項8のうちのいずれか一項記載の測定装置。

【請求項10】 演算手段は、下記式5に従って各微小区間の寄与率を演算した後、式1 (又は式2 若しくは式3) に基づいて上記各微小区間の散乱利得係数を演算することを特徴とする請求項3から請求項9のうちのいずれか一項記載の測定装置。

【数5】

$$a(i,j) = \frac{P_k(0)}{A} e^{-\alpha_p z} \cdot dz \quad \text{……式5}$$

但し、 $P_k(0)$  は不連続ポンプ光を  $n$  等分した場合に  $k$  番目となる不連続ポンプ光の分割された部分の入射端における強度であり、 $A$  はファイバコアの断面積であり、 $\alpha_p$  は不連続ポンプ光の減衰係数であり、 $z$  は不連続ポンプ光の入力端から所定の微小区間までの光路長であり、 $dz$  はこの微小区間の長さである。

【請求項11】 演算手段は、下記式6に従って各微小区間の歪み及び温度を演算することを特徴とする請求項3から請求項10のうちのいずれか一項記載の測定装置。

【数6】

(5)

特開2000-74697

7

8

但し、 $\Delta\nu$ は散乱光の周波数シフトであり、 $\Delta P_s$ は散乱光のパワーシフトあるいは散乱利得係数変化量であり、 $P(R)$ はレーザ散乱光強度あるいは不連続ポンプ光強度であり、 $C_{\epsilon\nu}$ 、 $C_{\epsilon p}$ 、 $C_{t\nu}$ 、 $C_{tp}$ は光ファイバに固有の定数である。

【請求項12】 反射部材が光ファイバの一端に設けられており、ポンプ光源は光ファイバの他端から不連続ポンプ光を入射し、プローブ光源は上記光ファイバの上記他端から不連続プローブ光を入射し、光強度検出器は上記光ファイバの上記他端から出力される出力光の光強度を

検出することを特徴とする請求項1から請求項7のうちのいずれか一項記載の測定装置。

【請求項13】 光ファイバは1つ又は複数の被測定物に固定されていることを特徴とする請求項1から請求項12のうちのいずれか一項記載の測定装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は光ファイバを用いて構造物などの被測定物に生じた歪みや温度を測定するための測定装置に関し、詳しくは、被測定物を高い空間分解能で測定することを可能とするための改良に関するものである。

【0002】

【従来の技術】図25は特開平3-120437号公報などの技術を用いた、光ファイバを用いて被測定物に生じた歪みや温度を測定するための従来の測定装置の構成を示すブロック図である。図において、1は被測定物であり、2は光ファイバであり、3はこの光ファイバ2の一端から不連続ポンプ光を入射するポンプ光源であり、4は光ファイバ2の他端から連続プローブ光を入射するプローブ光源であり、5は光ファイバ2の一端から出力される出力光の光強度をサンプリングして強度データを出力する光強度検出器であり、6はこの出力光を光強度検出器5に分散する合分波器であり、7はこの合分波器6と光強度検出器5との間の光路に配設され、出力光に含まれるブリルアン散乱光を透過するフィルタであり、8は強度データに基づいて光ファイバ2の所定の区間の歪み又は温度を演算する演算手段である。

【0003】次に動作について説明する。プローブ光源4が光ファイバ2の他端から連続プローブ光を入射した状態で、ポンプ光源3が光ファイバ2の一端に所定の周波数成分からなる最初の不連続ポンプ光を入射すると、この不連続ポンプ光は光ファイバ2内を移動しつつ、上記ポンプ光と連続プローブ光とは光ファイバ2の所定の位置で重なり、このプローブ光の周波数と散乱光の周波数とが一致していると増幅されて、検出可能な光強度のブリルアン散乱光などの散乱光を発生する。そして、合分波器6は光ファイバ2の上記一端から出力された出力光を分散し、フィルタ7はこれら出力光の中から増幅されたプローブ光（以下、ブリルアン散乱光と呼ぶ）のみ

を透過させ、光強度検出器5はこのブリルアン散乱光の光強度をサンプリングする。

【0004】このようなブリルアン散乱光の検出動作を連続プローブ光の周波数を変化させながら繰り返すと、演算手段8には光ファイバ2の所定の区間に関するプローブ光の所定の周波数範囲におけるブリルアン散乱光の強度データが蓄積され、ブリルアン散乱光のスペクトルが得られる。そして、演算手段8は最も高い検出レベルのブリルアン散乱光が得られた周波数をその所定の区間に関するブリルアン散乱光の中心周波数と判定し、光ファイバ2の歪み無し状態における基準中心周波数に対するこの中心周波数の周波数シフトを演算し、この周波数シフトに基づいて上記所定の区間の歪みを演算する。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】従来の測定装置は以上のように構成されているので、細かい空間分解能にて歪み又は温度を測定することができないという課題があった。具体例で説明すると、光ファイバ2には約1.5  $\mu$ mの波長の光に対して高い透過性を示す石英ファイバが一般的に利用され、実際にこの石英ファイバに上記波長の強い光（例えば8 mW程度以上の光）を入射してブリルアン散乱光を発生させた場合にはブリルアン散乱光は約50 MHz程度のバンド幅にて発生してしまう。従って、このような条件の下では、20 ns以下の継続時間（パルス幅に相当する）を有する不連続ポンプ光を入射したとしても、それに応じて発生するブリルアン散乱光は20 ns程度の時間に分散して出力されてしまうことになる。従って、不連続ポンプ光としては20 ns以上の継続時間を有するものを使用しなければならず、その結果、この不連続ポンプ光の幅に応じた長さ（光速を2  $\times 10^8$  m/sとすると、約2  $\times 10^8$  m/s  $\times 10 \times 10^{-9}$  s = 約2 m）以下の空間分解能にて測定することはできなかった。

【0006】この発明は上記のような課題を解決するためになされたもので、細かい空間分解能にて被測定物の歪みや温度を測定することができる測定装置を得ることを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】この発明に係る測定装置は、被測定物に固定される光ファイバと、上記光ファイバに不連続ポンプ光を入射するポンプ光源と、上記光ファイバに不連続プローブ光を入射するプローブ光源と、上記不連続プローブ光の周波数を設定するとともに所定の周波数範囲で上記不連続プローブ光の周波数を掃引する制御手段と、上記光ファイバから出力される出力光の光強度を検出する光強度検出器と、上記光強度検出器への上記出力光の光路に配設され、この出力光に含まれる散乱光を透過するフィルタと、上記光強度検出器で検出された光強度に基づいて上記光ファイバの測定区間内の所定の区間の歪み及び/又は温度を演算する演算手段と

を備えたものである。

【0008】この発明に係る測定装置は、光強度検出器が、測定区間を等分割して得られる複数の微小区間のそれぞれの長さの2倍に相当する所定の時間間隔で散乱光の光強度を計測するものである。

【0009】この発明に係る測定装置は、光ファイバの測定区間を $m$ 個の微小区間に等分割し、ポンプ光源は所定の時間間隔の $n$ 倍に相当する継続時間即ち幅を有する不連続ポンプ光を上記光ファイバへ入射し、演算手段 \*

(5)

特開2000-74697

15

\*は、上記所定の時間間隔で光強度検出器で検出された、不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における散乱光強度から下記式7に従って上記各微小区間の散乱利得係数を演算し、この散乱利得係数に基づいて上記各微小区間に関する散乱光の周波数シフトを演算し、更に、散乱光の周波数シフト及び/又は散乱光強度に基づき上記各微小区間の歪み及び/又は温度を演算するものである。

【0010】

【数7】

$$\begin{pmatrix} a(1,1) & a(1,2) & \cdots & a(1,n) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a(2,2) & a(2,3) & \cdots & a(2,n+1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & a(i,i) & a(i,i+1) & \cdots & a(i,i+n-1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & a(m,m) & a(m,m+1) & \cdots & a(m,m+n-1) & \cdots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_s(1) \\ g_s(2) \\ \vdots \\ g_s(i) \\ \vdots \\ g_s(m) \\ \vdots \\ g_s(m+n-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_s(1) \\ Q_s(2) \\ \vdots \\ Q_s(i) \\ \vdots \\ Q_s(m) \\ \vdots \\ Q_s(m) \end{pmatrix}$$

……式7

【0011】但し、 $Q_s(i)$  ( $i=1 \sim m$ )は、少なくとも、上記不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における、上記測定区間の一端部に最も近い微小区間から数えて $i$ 番目から $(i+n-1)$ 番目の微小区間に関する散乱光強度と上記光ファイバに入射した不連続プローブ光強度とによって決まる変数であり、 $g_s(i)$ は、上記不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における、上記 $i$ 番目の微小区間の散乱利得係数であり、 $a(i,j)$ は $Q_s(i)$ に対する $j$ 番目の微小区間に関する散乱光の光強度の割合を示す寄与率である。

【0012】この発明に係る測定装置は、被測定物に固定され、それぞれ所定の長さを有する $m$ 個の微小区間に等分割された測定区間を有する光ファイバを備え、ポンプ光源が、各不連続プローブ光に対して、各微小区間の長さの2倍に相当する所定の時間間隔の $n$ 倍に相当する継続時間即ち幅を有する不連続ポンプ光を上記光ファイ

バへ入射し、プローブ光源が、制御手段により設定された上記不連続プローブ光の設定周波数毎に、上記所定の時間間隔を単位に所定の継続時間即ち幅を有する不連続光を分割して得られる、それぞれ一連の複数のパルス光から成る、少なくとも2つの不連続プローブ光のそれぞれと不連続ポンプ光とを上記光ファイバの所定の場所で見合うように上記制御手段による制御のもとで順次上記光ファイバに入射し、演算手段が、光強度検出器により検出された光強度から下記式8に基づいて上記各微小区間の散乱利得係数を演算し、この散乱利得係数に基づいて上記各微小区間に関する散乱光の周波数シフトを演算し、更に、散乱光の周波数シフト及び/又は散乱光強度に基づき上記各微小区間の歪み及び/又は温度を演算するものである。

【0013】

【数8】



(7)

特開2000-74697

$$\begin{array}{c} 11 \\ \left( \begin{array}{ccccccc} a(1,1) & a(1,2) & \cdots & a(1,n) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a(2,2) & a(2,3) & \cdots & a(2,n+1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & a(i,i) & a(i,i+1) & \cdots & a(i,n+1) & 0 \cdots 0 \\ \vdots & & & & & & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & a(m,m) & a(m,m+1) & \cdots & a(m,m+n-1) & \end{array} \right) \end{array}$$

$$\begin{array}{c} 12 \\ \left( \begin{array}{c} gs(1) \\ gs(2) \\ \vdots \\ gs(i) \\ \vdots \\ gs(m) \\ \vdots \\ gs(m+n-1) \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} Qs(1) \\ Qs(2) \\ \vdots \\ Qs(i) \\ \vdots \\ Qs(m) \end{array} \right) \end{array}$$

……式8

【0014】但し、 $Qs(i)$  ( $i=1 \sim m$ )は、少なくとも、上記不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における、上記測定区間の一端部に最も近い微小区間から数えて $i$ 番目から $(i+n-1)$ 番目の微小区間に関する散乱光強度と上記光ファイバに入射した不連続プローブ光強度とによって決まる変数であり、 $gs(i)$ は、上記不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における、上記1番目の微小区間の散乱利得係数であり、 $a(i, j)$ は $Qs(i)$ に対する $j$ 番目の微小区間に関する散乱光強度の割合を示す寄与率である。

【0015】この発明に係る測定装置は、被測定物に固定され、それぞれ所定の長さを有する $m$ 個の微小区間に等分割された測定区間を有する光ファイバを備え、ポンプ光源が、各不連続プローブ光に対して、各微小区間の長さの2倍に相当する所定の時間間隔の $n$ 倍に相当する継続時間即ち幅を有する不連続ポンプ光を上記光ファイバに入射し、プローブ光源が、制御手段により設定され\*30

\*た上記不連続プローブ光の設定周波数毎に、上記所定の時間間隔に等しい所定のパルス繰り返し周期を有する一連の複数のパルス光を上記光ファイバに入射するか、又は、この一連の複数のパルス光を分割して得られる、それぞれ一連の複数のパルス光から成る、少なくとも2つの不連続プローブ光のそれぞれと不連続ポンプ光とを上記光ファイバの所定の場所で重なるように上記制御手段による制御のもとで順次上記光ファイバに入射し、演算手段が、光強度検出器により検出された光強度から下記式9に基づいて上記各微小区間の散乱利得係数を演算し、この散乱利得係数に基づいて上記各微小区間からの散乱光の周波数シフトを演算し、更に、散乱光の周波数シフト及び/又は散乱光強度に基づき上記各微小区間の歪み及び/又は歪みを演算するものである。

【0016】

【数9】

$$\begin{array}{c} \left( \begin{array}{ccccccc} a(1,1) & a(1,2) & \cdots & a(1,n) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a(2,2) & a(2,3) & \cdots & a(2,n+1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & a(i,i) & a(i,i+1) & \cdots & a(i,n+1) & 0 \cdots 0 \\ \vdots & & & & & & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & a(m,m) & a(m,m+1) & \cdots & a(m,m+n-1) & \end{array} \right) \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \left( \begin{array}{c} gs(1) \\ gs(2) \\ \vdots \\ gs(i) \\ \vdots \\ gs(m) \\ \vdots \\ gs(m+n-1) \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} Qs(1) \\ Qs(2) \\ \vdots \\ Qs(i) \\ \vdots \\ Qs(m) \end{array} \right) \end{array}$$

……式9

【0017】但し、 $Qs(i)$  ( $i=1 \sim m$ )は、少なくとも、上記不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における、上記測定区間の一端部に最も近い微小区間から数えて $i$ 番目から $(i+n-1)$ 番目の微小区間に関する散乱光強度と上記光ファイバに入射した不連続プローブ光強度とによって決まる変数であり、 $gs(i)$ は、上記不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における、上記1番

目の微小区間の散乱利得係数であり、 $a(i, j)$ は $Qs(i)$ に対する $j$ 番目の微小区間に関する散乱光強度の割合を示す寄与率である。

【0018】この発明に係る測定装置は、各不連続プローブ光に含まれる複数のパルス光が、一定の繰り返し周期を有するものである。

【0019】この発明に係る測定装置は、各不連続プロ

13

ープ光に含まれる複数のパルス光が、所定のコードに対応した必ずしも一定ではない間隔で断続的に連なるものである。

【0020】この発明に係る測定装置は、ポンプ光源が光ファイバの一端から不連続ポンプ光を入射し、プローブ光源が上記光ファイバの他端から不連続プローブ光を入射し、光強度検出器が上記光ファイバの上記一端から出力される出力光の光強度を検出し、演算手段は、下記式10に従って、不連続プローブ光の光ファイバ中での減衰量を加算して、変数 $Qs(i)$ を求めるものである。

【0021】

【数10】

$$Qs(i) = Qs \left\{ \frac{Ps(t,0)}{Ps(t-\frac{L}{c},L)} \right\} + \alpha_s L \quad \cdots \text{式10}$$

【0022】但し、 $Ps(t,0)$ は上記光強度検出器により検出されたブリルアン散乱光強度であり、 $Ps(t-L/c, L)$ は上記光ファイバの上記他端で時刻 $(t-L/c)$ に検出されたプローブ光強度であり、 $\alpha_s$ は

$$a(L) = \frac{Pk(0)}{A} e^{-\alpha_p z} dz$$

【0026】但し、 $Pk(0)$ は不連続ポンプ光を $n$ 等分した場合に $k$ 番となる微小不連続ポンプ光の入射端における強度であり、 $A$ はファイバコアの断面積であり、 $\alpha_p$ は不連続ポンプ光の減衰係数であり、 $z$ は不連続ポンプ光の入力端から所定の微小区間までの光路長であり、 $dz$ はこの微小区間の幅である。

$$\begin{pmatrix} \frac{\Delta \nu}{\Delta Ps} \\ \frac{\Delta Ps}{P(R)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C\varepsilon \nu & C\varepsilon \nu \\ C\varepsilon p & C\varepsilon p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad \cdots \text{式12}$$

【0029】但し、 $\Delta \nu$ は散乱光の周波数シフトであり、 $\Delta Ps$ は散乱光のパワーシフトあるいは利得係数変化量であり、 $P(R)$ はレーリー散乱光強度あるいは不連続ポンプ光強度であり、 $C\varepsilon \nu$ 、 $C\varepsilon p$ 、 $C\varepsilon \nu$ 、 $C\varepsilon p$ は光ファイバに固有の定数である。

【0030】この発明に係る測定装置は、反射部材が光ファイバの他端に設けられており、ポンプ光源が光ファイバの一端から不連続ポンプ光を入射し、プローブ光源が上記光ファイバの上記一端から不連続プローブ光を入射し、光強度検出器が上記光ファイバの上記一端から出力される出力光の光強度を検出するものである。

【0031】この発明に係る測定装置は、光ファイバが1つ又は複数の被測定物に固定されているものである。

【0032】

【発明の実施の形態】以下、この発明の実施の一形態を説明する。

実施の形態1. 図1はこの発明の実施の形態1による測定装置を示すブロック図である。図において、1は橋、梁、建物などの構造物（被測定物）であり、2はこの

(8)

特開2000-74697

14

\*  $s$ は上記不連続プローブ光の減衰係数であり、 $L$ は上記光ファイバの全長であり、 $c$ は上記光ファイバ中での不連続プローブ光の伝播速度である。

【0023】この発明に係る測定装置は、散乱利得係数 $gs(m+1)$ から $gs(m+n-1)$ （又は $gs(1)$ から $gs(n-1)$ ）に関する、光ファイバの被測定物に固定されていない部位である参照ファイバ部の温度を測定する温度測定手段を備え、演算手段は、上記測定温度に応じて $gs(m+1)$ から $gs(m+n-1)$ （又は $gs(1)$ から $gs(n-1)$ ）までの利得係数を演算した後、式7（又は式8若しくは式9）に基づいて上記各微小区間の散乱利得係数を演算するものである。

【0024】この発明に係る測定装置は、演算手段が、下記式11に従って各微小区間の寄与率を演算した後、式7（又は式8若しくは式9）に従って上記各微小区間の散乱利得係数を演算するものである。

【0025】

【数11】

\* 【0027】この発明に係る測定装置は、演算手段が、下記式12に従って各微小区間の歪み及び温度を演算するものである。

【0028】

【数12】

構造物1に固定される光ファイバであり、3はこの光ファイバ2の一端から不連続ポンプ光を入射するポンプ光源であり、4は光ファイバ2の他端から不連続プローブ光を入射するプローブ光源であり、5は光ファイバ2の一端から出力される出力光強度をサンプリングして光強度データを出力する光強度検出器であり、6はこの出力光を光強度検出器5に分波する合分波器であり、7はこの合分波器6と光強度検出器5との間の光路に配設され、出力光に含まれるブリルアン散乱光を透過するフィルタであり、8は光強度データに基づいて光ファイバ2の所定の区間の歪み及び/又は温度を演算する演算手段。20はプローブ光源4から出射される不連続プローブ光の周波数を所定の周波数範囲の設定周波数 $\nu_s$ に設定するとともに不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ を所定の周波数範囲内で掃引し、さらに、不連続プローブ光と不連続ポンプとが光ファイバ2の所定の区間で出会うように即ち重なり合うようにポンプ光源3及びプローブ光源4を制御し、光強度検出器5で行われるサンプリングを制御する制御手段である。なお、光ファイバ2は橋

15

造物1を形成する際にその内部に埋め込まれても、構造物1の表面に粘着されてもよい。

【0033】この実施の形態1では、不連続ポンプ光として20nsの継続時間（パルス幅に相当する）、100mWの出力を有するポンプ光を使用し、不連続プローブ光として20nsの継続時間、3mWの出力を有するプローブ光を使用する。

【0034】次に動作について説明する。ここでは、構造物1の温度変化がない場合に、ブリルアン散乱光を用いて構造物1の歪みを所定の区間について測定する場合について説明する。また、この実施の形態1では、不連続プローブ光の先頭が不連続ポンプ光の先頭と出会い、不連続プローブ光の先頭が不連続ポンプ光の末端とすれ違う間に不連続プローブ光の先端が移動する区間が所定の区間であり得る。これに代わって、不連続プローブ光の中心部等の他の特定の部分が不連続ポンプ光の先頭と出会い、不連続プローブ光の他の特定の部分が不連続ポンプ光の末端とすれ違う間に不連続プローブ光の先端が移動する区間が所定の区間であってもよい。いずれにしても、その長さは不連続ポンプ光のパルス幅の半分の時間即ち10nsの間に不連続プローブ光が移動する距離に等しく、約2m（光速を約 $2 \times 10^8$  m/sとすると、 $2 \times 10^8$  m/s  $\times$   $10 \times 10^{-9}$  s = 2m）となる。

【0035】図2はこの発明の実施の形態1による測定装置の動作を示すフローチャートである。図において、ST1は制御手段20がプローブ光源4から出力された不連続プローブ光の周波数を所定の設定周波数 $\nu_s$ に設定するプローブ周波数設定ステップであり、ST2は制御手段20の制御のもとでプローブ光源4が光ファイバ2へ不連続プローブ光を入射するプローブ光入射ステップであり、ST3は制御手段20の制御のもとでポンプ光源3が光ファイバ2の構造物1に固定された測定区間内の、このステップで設定される所定の区間のプローブ光源4側の端部において不連続プローブ光と不連続ポンプ光とが出会うように、不連続ポンプ光を光ファイバ2へ入射するポンプ光入射ステップであり、ST4は光強度検出器5がこれら不連続ポンプ光と不連続プローブ光との相互作用によって発生する強いブリルアン散乱光を含む出力光の光強度をサンプリングするサンプリングステップであり、ST5は制御手段20が、光ファイバ全長にわたって上記ST1で設定された設定周波数 $\nu_s$ における散乱光強度を測定し終えたか否かを判定し、該測定が完了するまでサンプリングステップST4を繰り返させる特定周波数測定完了判定ステップであり、ST6は制御手段20がブリルアン散乱光が発生すると予測される不連続プローブ光の測定周波数範囲について測定が完了したか否かを判定し、全ての測定が完了するまでプローブ周波数設定ステップST1から特定周波数測定完了判定ステップST5までを繰り返させる測定完了判定

(9)

特開2000-74697

16

ステップであり、ST7は演算手段8がステップST3で光ファイバ2に設定された所定の区間に関するブリルアン散乱光強度のスペクトルに基づいて所定の区間の歪みを演算する演算ステップである。

【0036】図3はこの発明の実施の形態1による測定装置により測定された、所定の区間に関するブリルアン散乱光の光強度（散乱利得係数）のスペクトルを示すグラフである。図において、横軸は周波数、縦軸は光強度である。また、9はポンプ光と同一の中心周波数を有するレイリー散乱光であり、10はブリルアン散乱のストークス光であり、11はブリルアン散乱の反ストークス光であり、12は周波数シフトが生じたブリルアン散乱のストークス光であり、13は周波数シフトが生じたブリルアン散乱の反ストークス光である。また、 $g_s$

(i)は不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における散乱利得係数である。なお、ラマン散乱光のストークス光はブリルアン散乱のストークス光よりも高い周波数の領域に生じ、ラマン散乱光の反ストークス光はブリルアン散乱の反ストークス光よりも低い周波数の領域に生じている。そして、この実施の形態1では同図において14に示すような周波数範囲をプローブ光の測定周波数範囲即ち所定の周波数範囲として測定している。

【0037】図4はこの発明の実施の形態1による図2に示す演算ステップST7の詳細な演算処理手順を示すフローチャートである。図において、ST8は、演算手段8が所定の区間に対してST1～ST6において不連続プローブ光の周波数を所定の周波数範囲14内で掃引して得られた光強度データを図3のようにプロットしてスペクトルを得、このスペクトルから上記所定の区間に関するブリルアン散乱光の中心周波数を演算する中心周波数演算ステップであり、中心周波数は散乱光強度即ち散乱利得係数の最大値の周波数として求められる。ST9は、演算手段8がこの所定の区間について求めた上記中心周波数と光ファイバ2におけるブリルアン散乱光の標準的な基準中心周波数との周波数シフトを演算する周波数シフト演算ステップであり、ST10は、演算手段8が予め判っている周波数シフトと歪みとの特性関係に従って上記所定の区間に関するブリルアン散乱光の中心周波数の周波数シフトに基づき上記所定の区間の歪みを演算する歪み演算ステップである。

【0038】図5は予め判っている周波数シフトと歪みとの特性関係の一例を示す特性図である。図において、横軸は周波数シフトであり、縦軸は歪みである。

【0039】以上のように、この実施の形態1によれば、光ファイバ2の一端からプローブ光源4が不連続プローブ光を入射するとともに、制御手段20による制御のもとにポンプ光源3が不連続ポンプ光の入射タイミングを制御しつつ光ファイバ2の他端から不連続ポンプ光を入射し、これら不連続ポンプ光と不連続プローブ光との相互作用で生じるブリルアン散乱光を光強度検出器5で

(10)

特開2000-74697

17

検出し、更に、このブリルアン散乱光の中心周波数の周波数シフトに基づき光ファイバ2の測定区間の所定の区間の歪みを演算することができる。従って、光ファイバ2の被測定物1に固定される部位の歪みを検出することにより、この被測定物1自体に生じている歪みを検出することができる効果がある。即ち、不連続ポンプ光の継続時間即ち幅の半分に対応する長さを有し、不連続プローブ光と不連続ポンプ光との光ファイバ2への入射タイミングで決まる所定の区間の長さに等しい空間分解能で被測定物1に生じている歪みを測定することができる。

【0040】また、上記したように、不連続ポンプ光の入射タイミングと不連続プローブ光の入射タイミングとを制御して上記所定の区間をずらすことにより、光ファイバ2の任意の位置の歪みを測定でき、さらには測定区間全体の歪み分布を測定できる。

【0041】また、この実施の形態1では、ブリルアン散乱光を用いて被測定物1の歪み分布を測定する例を説明したが、同様の手法により、構造物1の歪み変化がない場合における構造物1の温度変化とブリルアン散乱光の周波数シフトとの関係を用いて被測定物1の温度分布を測定することができる。

【0042】更に、磁歪材料で被覆した光ファイバを用いれば、高空間分解能で磁気分布を測定することもできる。

【0043】実施の形態2。この発明の実施の形態2による測定装置では、光強度検出器5は、所定の有効サンプリング周期（所定の時間間隔） $T_s$ 例えば0.5ns（この場合、有効サンプリングレートは2GHzとなる）でブリルアン散乱光の強度を計測し、演算手段8は、この有効サンプリング周期 $T_s$ 毎に得られる複数の強度データに基づいて、光ファイバ2の測定区間を等分割した複数の微小区間のそれぞれの歪みを演算して、測定区間の歪み分布を求める。これ以外の構成は実施の形態1と同様であり説明を省略する。なお、光強度検出器5のサンプリングは、実際には、4～5GHzのサンプリングレート即ち0.25～0.2nsのサンプリング周期で実施される。この発明では、上記の所定の有効サンプリング周期は、サンプリングされた複数の強度データのうち実際に演算に使用されるデータの測定時間間隔のことを意味しており、例えば、4GHzのサンプリングレートでは、1つおきに光強度データを使用することは、所定の有効サンプリング周期（所定の時間間隔） $T_s$ が0.5nsであることに相当する。なお、不連続ポンプ光の各パルスは、典型的には、20nsの継続時間即ちパルス幅を有しており、不連続プローブ光の各パルスは、任意の継続時間即ちパルス幅を有しているが、以下では、説明を簡単にするために、20nsの幅を有しているとする。

【0044】図6（a）はこの発明の実施の形態2によ

18

る光ファイバ2の測定区間に設定される複数の微小区間を示す説明図である。図において、光ファイバ2と平行に描画された矢線は光ファイバ2の絶対位置を示す2端であり、Lは光ファイバ2の長さであり、 $z(1) \sim z(m)$ は構造物1に固定された測定区間をm個に分割して得られる複数の微小区間である。nは、不連続ポンプ光のパルス幅を有効サンプリング周期 $T_s$ で割って得られる数に相当しており、これは以下で示すように、各サンプリングで得られるブリルアン散乱光が微小区間何個分に相当する区間に関わっているかを示す数であり、以下で示すように、不連続ポンプ光のパルス幅は微小区間2n個分に相当する。この実施の形態2では、nは40（ $=20\text{ns}/0.5\text{ns}$ ）となる。また、図6（b）、6（c）は、これらの複数の微小区間の位置関係及び各微小区間 $z(i)$ の長さを例示的に説明するための図である。t=0で図6（b）に示すように不連続ポンプ光と不連続プローブ光とが出会ったとすると、不連続プローブ光の先頭部分によって計測される区間は、図に示すように、その先頭部分が不連続ポンプ光と出会う不連続ポンプ光の末端とすれ違う間に進行する区間即ち $z(1) \sim z(n)$ （ $n \times T_s / 2$ に相当する長さを有する）である。さらに、t= $T_s/2$ の図6（c）に示すように、不連続プローブ光の先頭部分から $T_s$ 後の部分によって計測される区間は、その部分が図のように不連続ポンプ光と出会う不連続ポンプ光の末端とすれ違う間に進行する区間即ち $z(2) \sim z(n+1)$ （ $n \times T_s / 2$ に相当する長さを有する）であり、不連続プローブ光の先頭とは $d/2$ 即ち1微小区間だけプローブ光源4側へシフトした区間である。同様にして、不連続プローブ光の先頭部分から2 $T_s$ 後の部分によって計測される区間は、その部分が不連続ポンプ光と出会う不連続ポンプ光の末端とすれ違う間に進行する区間即ち $z(3) \sim z(n+2)$ である。このようにして、複数の微小区間 $z(i)$ （ $i=1 \sim m$ ）が定義される。なお、図6（b）、6（c）からわかるように、不連続ポンプ光のパルス幅は微小区間2n個分に相当する。

【0045】例えば、5cmの空間分解能を得ようとするならば、即ち各微小区間の長さを5cmに設定するためには、有効サンプリング周期 $T_s$ は0.5ns（光速を $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ とすると、 $(2 \times 0.05 \text{ m}) / (2 \times 10^8 \text{ m/s}) = 0.5 \text{ ns}$ ）である必要がある。このように、有効サンプリング周期 $T_s$ は所望の空間分解能により決定される。図6（a）に示す微小区間 $z(m+1) \sim z(m+n-1)$ は光ファイバ2の被測定物1に隣接する部位であり、以下においてこの部分を参照ファイバ部とよび、上記光ファイバ2の被測定物1に固定された部位 $z(1) \sim z(m)$ を検出ファイバ部とよぶ。なお、参照ファイバ部は、ポンプ光が入射される光ファイバ2の端部である微小区間 $z(1) \sim z(n-1)$ であってもよい。この場合、測定区間1である検出

(11)

特開2000-74697

19

25

ファイバ部は $z(n) \sim z(m+n-1)$ である。

【0046】次に動作について説明する。図7はこの発明の実施の形態2による測定装置の動作を示すフローチャートである。図において、ST21は制御手段20がプローブ光源4から出力された不連続プローブ光の周波数を所定の設定周波数 $\nu_s$ に設定するプローブ周波数設定ステップであり、ST22は制御手段20の制御のもとでプローブ光源4が光ファイバ2への一連のパルス光から成る不連続プローブ光の入射を開始するプローブ光入射開始ステップであり、ST23は制御手段20の制御のもとでポンプ光源3が光ファイバ2の構造物1に固定された測定区間に設定された所定の区間のプローブ光源4側の端部において不連続プローブ光の一パルスと不連続ポンプ光の対応するパルスとが出会うように、且つ、上記所定の区間がシフトするように不連続ポンプ光の各パルスの光ファイバ2への入射タイミングを制御しつつ、不連続ポンプ光の光ファイバ2への入射を開始するポンプ光入射開始ステップであり、ST24は光強度検出器5がこれら不連続ポンプ光と不連続プローブ光との相互作用によって発生する強いブリルアン散乱光をさ  
20 出出力光の光強度をサンプリングするサンプリングステップであり、ST25は制御手段20が、所定の区間をシフトしつつ光ファイバ全長にわたって上記ST21で設定された設定周波数 $\nu_s$ における散乱光強度を測定し終えたか否かを判定し、該測定が完了するまでサンプリングステップST24を繰り返させる特定周波数測定完了判定ステップであり、ST26は制御手段20がブリルアン散乱光が発生すると予測される不連続プローブ光の測定周波数範囲について測定が完了したか否かを判定し、全ての測定が完了するまでプローブ周波数設定ステップST21から特定周波数測定完了判定ステップST25までを繰り返させる測定完了判定ステップであり、ST27は演算手段8が光ファイバ2に設定された複数の微小区間のそれぞれに関するブリルアン散乱光強度のスペクトルに基づいて微小区間毎の歪みを演算する演算ステップである。さらに、図8は図7に示す演算ステップST27の詳細な演算処理手順を示すフローチャートである。図において、ST11は、0.5nsの有効サンプリング周期でサンプリングされた図9に示すような複数のブリルアン散乱光の光強度データ $P_s(t_1, 0)$ 、 $P_s(t_2, 0)$ 、 $P_s(t_3, 0)$ 、...  
40 (ここで、光強度データ $P_s(t, 0)$ は時刻 $t$ に測定された $z=0$ での光強度データである)から、演算手段8がプローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における各微小区

間 $z(i)$ の散乱利得係数を演算する利得係数演算ステップである。なお、図9に示す光強度データ $P_s(t, 0)$ は、不連続プローブ光の先頭部分によって生じる微小区間 $z(1) \sim z(n)$ に関するブリルアン散乱光の光強度データを示しており、同様に、光強度データ $P_s(t, 0)$  ( $i$ は2以上整数)は、有効サンプリング周期 $T_s$ に $(i-1)$ を乗じた $T_s(i-1)$ に等しい時間だけ、不連続プローブ光の先頭から後方にある $i$ 番目の部分によって生じる微小区間 $z(i) \sim z(i+n-1)$ に関するブリルアン散乱光の光強度データを示している。さらに、図8において、ST12は、各微小区間に対して、ST21～ST26において不連続プローブ光の所定の設定周波数 $\nu_s$ を掃引して得られた光強度データをプロットしてスペクトルを得、このスペクトルから各微小区間に関するブリルアン散乱光の中心周波数を演算する中心周波数演算ステップであり、ST13は、各微小区間について求めた上記中心周波数と予め得られた光ファイバ2におけるブリルアン散乱光の標準的な基準中心周波数との周波数シフトを演算する周波数シフト演算ステップであり、ST14は、予め判  
50 っている周波数シフトと歪みとの特性関係に従って各微小区間に関するブリルアン散乱光の中心周波数の周波数シフトに基づき各微小区間の歪みを演算する歪み演算ステップである。

【0047】式13はこの実施の形態2の利得係数演算ステップST11において用いられる、不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における複数の微小区間の散乱利得係数を演算するための利得演算行列式である。式において、 $Q_s(i)$  ( $i=1 \sim m$ )は、少なくとも、不連続  
60 プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における、図6(a)に示す複数の微小区間 $z(1) \sim z(i+n-1)$ に関するブリルアン散乱光の強度及び光ファイバ2に入射した不連続プローブ光の強度によって決まる変数であり、 $g_s(j)$ は不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における各微小区間 $z(j)$ の散乱利得係数であり、 $a(i, j)$ は変数 $Q_s(i)$ に対する $j$ 番目の微小区間 $z(j)$  ( $j=1 \sim (i+n-1)$ )に関するブリルアン散乱光の強度データの割合を示す寄与率である。この寄与率は、以下で示すように、不連続ポンプ光が完全な矩形波ではないことと不連続ポンプ光の光ファイバ2中での減衰を考慮して決定される。

【0048】

【数13】

(12)

特開2000-74697

$$\begin{array}{c}
 21 \\
 \left( \begin{array}{ccccccc}
 a(1,1) & a(1,2) & \cdots & a(1,n) & 0 & \cdots & 0 \\
 0 & a(2,2) & a(2,3) & \cdots & a(2,n+1) & 0 & \cdots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & \cdots & a(i,j) & a(i,i+1) & \cdots & a(i,i+n-1) & 0 & \cdots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & \cdots & \cdots & a(m,m) & a(m,m+1) & \cdots & a(m,m+n-1) & \cdots & 0
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 22 \\
 \left( \begin{array}{c}
 g_s(1) \\
 g_s(2) \\
 \vdots \\
 g_s(i) \\
 \vdots \\
 g_s(m) \\
 \vdots \\
 g_s(m+n-1)
 \end{array} \right)
 =
 \left( \begin{array}{c}
 Q_s(1) \\
 Q_s(2) \\
 \vdots \\
 Q_s(i) \\
 \vdots \\
 Q_s(m) \\
 \vdots \\
 Q_s(m+n-1)
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

……式13

【0049】実際は、上記式13は積分形式で表記された下記式14を書き換えることにより得られる。図10は同式の各変数の関係を説明するための説明図である。式14において、 $P_s(t, 0)$ は $Z=0$ の位置で時刻 $t$ に測定された実際のブリルアン散乱光強度即ちプローブ光強度であり、 $P_s(t-L/c, L)$ は $Z=L$ の位置で時刻 $(t-L/c)$ に測定されたプローブ光強度であり、 $g(Z, \nu)$ は利得係数であり、 $S_p(Z)$ はポンプ光のエネルギー密度で、ポンプ光の強度をその断面積（ファイバのコアの断面積）で割ったものであり、 $dz$ はポンプ光に設定される微小区間であり、 $\alpha_s$ はプローブ光の減衰係数であり、 $L$ は光ファイバ2の全長であり、 $c$ は光ファイバ2中での不連続プローブ光の伝播速\*

度である。また、同式の左辺は光強度検出器5で検出された散乱光強度の対数であり、同式の右辺第1項は一連の振幅の微小区間に関する散乱光強度、即ち $Q_s(i)$ に相当し、同式の右辺第2項はプローブ光の光ファイバ2中での減衰量であり、同式の右辺第3項は光ファイバ2に入射したプローブ光強度の対数である。そして、同式の右辺第1項を「 $a(i, j) = S_p(z) \cdot dz$ 」として離散表示すると、「 $\{Q_s(i)\} = [a(i, j)] \{g(Z, \nu)\}$ 」となり、これは上記式13の各行列要素と等価である。

【0050】

【数14】

$$\ln P_s(t, 0) = \int_{z_0}^{z_L} g(z, \nu) \cdot S_p(z) dz - \alpha_s L + \ln \{P_s(t-L/c, L)\}$$

……式14

【0051】演算手段8は、上記式13に従って各微小区間 $z(i)$ （ $i=1 \sim m$ ）の散乱利得係数 $g_s(i)$ を演算する前に、上記式14から得られる下記式15に※

※従って変数 $Q_s(i)$ を計算する。

【0052】

【数15】

$$Q_s(i) = \ln \left\{ \frac{P_s(t, 0)}{P_s(t-L/c, L)} \right\} + \alpha_s L$$

……式15

【0053】次に、変数 $Q_s(i)$ に対する $j$ 番目の微小区間 $z(j)$ （ $j=1 \sim (i+n-1)$ ）に関するブリルアン散乱光の強度データの割合を示す寄与率 $a(i, j)$ を計算する方法について説明する。図11は光ファイバ2内に入射した不連続ポンプ光の伝播特性を示す説明図である。同図に示すように、光ファイバ2の一端から入射した不連続ポンプ光は光ファイバ2内を伝播するにつれて、その振幅が減衰し、また、波形の立ち上がりや立ち下がりがなまってくる。

【0054】図12は光ファイバ2に入射する不連続ポンプ光の波形の一例を示す波形図である。図において横軸は時間、縦軸は強度であり、図のように各微小区間の幅 $dz$ 単位にポンプ光を $n$ 個の微小ポンプ光 $P_k$ （ $k=$

1～ $n$ ）に分割する。式16は各微小区間の寄与率 $a(i, j)$ を演算する寄与率演算式である。同式において、 $P_k(0)$ は $k$ 番目の微小ポンプ光 $P_k$ の入射端における強度であり、 $A$ は光ファイバコアの断面積であり、 $\alpha_p$ は減衰係数であり、 $z$ は上記入射端からの距離であり、 $dz$ は微小区間の長さである。そして、演算手段8は、図12に示される入射時ポンプ光の波形データの各微小ポンプ光 $P_k$ の強度 $P_k(0)$ と各微小ポンプ光 $P_k$ が関わる微小区間 $z(j)$ の位置 $z$ に基づき下記式16に従い各微小区間の寄与率 $a(i, j)$ を演算する。

【0055】

【数16】

(13)

特開2000-74697

23

24

$$a(i,j) = \frac{P_k(0)}{A} e^{-\alpha p^2} \cdot dz$$

……式13

【0056】そして、この実施の形態2では、上式13において、 $Q_s(i)$ に上記式15に従って計算した値を代入し、各奇与率 $a(i, j)$ に上記式16により計算した値を代入し、 $g_s(m+1) \sim g_s(m+n-1)$ に歪み無し状態における光ファイバ2の散乱利得係数の標準値を代入して、各微小区間 $z(i)$  ( $i=1 \sim m$ )の散乱利得係数 $g_s(i)$ を演算する。なお、この散乱利得係数 $g_s(i)$ は各微小区間 $z(i)$ に関する

ブリルアン散乱光の光強度によって決まる変数 $Q_s(i)$ に応じた値となるものなので、不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ を所定の周波数範囲で掃引して得られた散乱利得係数 $g_s(i)$ を各微小区間 $z(i)$ ごとにプロットした場合には図3と同様の利得分布図が得られ、中心周波数演算ステップST12では強度データによって決まる変数の代わりに散乱利得係数 $g_s(i)$ に基づいて各微小区間 $z(i)$ に関するブリルアン散乱光の中心周波数を演算することができる。

【0057】以上のように、この実施の形態2によれば、光強度検出器5により各微小区間 $z(i)$ の長さの2倍に相当する所定の有効サンプリング周期で散乱光強度をサンプリングし、演算手段8により上記式13の行列演算を用いて各微小区間 $z(i)$ の散乱利得係数を計算することにより、不連続ポンプ光の継続時間の制限（例えば20ns）に拘わらず、不連続ポンプ光の継続時間で決まる区間よりも細かい微小区間 $z(i)$ （例えば5cm）ごとの歪みを演算することができる。

【0058】さらに、演算手段8は、光強度検出器5で検出されたブリルアン散乱光強度 $P_s(t, 0)$ 及び入射したプローブ光強度 $P_s(t-L/c, 0)$ とプローブ光の光ファイバ2中での減衰量とに基づき上記式15に従って変数 $Q_s(i)$ を求め、各微小区間 $z(i)$  ( $i=1 \sim m$ )の散乱利得係数 $g_s(i)$ を演算するので、プローブ光の光ファイバ2中での減衰に伴うブリルアン散乱光の光強度の減衰を補正して、各微小区間に関するブリルアン散乱光の光強度に近い値を有する $Q_s(i)$ を用いて各微小区間の歪みを演算することができる。また、演算手段8は各微小区間の奇与率 $a(i, j)$ を不連続ポンプ光の減衰特性を考慮して上記式16に従って演算しているため、各微小区間の散乱利得係数 $g_s(i)$ の誤差を削減することができる。

【0059】更に、従来の測定装置よりもはるかに細かい微小区間 $z(i)$ ごとの歪みを測定することができるので、橋、隧道、建物などの構造物のみならず、発電機、人工衛星、飛行機、エレベーターケーブルなどの機器などにも利用して、その歪みの発生状態を有効に測定することができる効果がある。

【0060】なお、この実施の形態2では、ブリルアン散乱光を利用して被測定物1の歪みを微小区間毎に効率

よく測定する例を説明したが、同様の手法により、構造物1の歪み変化がない場合における構造物1の温度変化とブリルアン散乱光の周波数シフトとの関係を利用して被測定物1の温度を微小区間毎に効率よく測定することができる。なお、構造物1の温度変化とラマン散乱光の強度との関係を利用して、同様の手法により被測定物1の温度を微小区間毎に効率よく測定することができる。

【0061】実施の形態3. 図13(b)はこの発明の実施の形態3による測定装置で使用する不連続プローブ光の波形を示す図である。同図に示すように、この不連続プローブ光は、光ファイバ2の測定区間を等分割した、図6(a)に示すような各微小区間 $z(i)$ の長さの2倍に相当する所定の時間間隔 $T_p$ （これは上記実施の形態2における所定の有効サンプリング周期 $T_s$ に相当している）単位に、図13(a)に示すような所定の継続時間即ち幅を有する単パルス分割して得られる、 $2T_p$ の一定の繰り返し周期を有する一連の複数のパルス光から成る。所定の区間の測定を行うためには、以下で示すように、プローブ光源4は、さらに、図13(c)に示すような、図13(b)に示す不連続プローブ光に対して $T_p$ だけ遅れている、 $2T_p$ の一定の繰り返し周期を有する一連の複数のパルス光から成る他の不連続プローブ光を同一の所定の区間で対応する不連続ポンプ光と出会うように、制御手段20による制御のもとで光ファイバ2に入射する。

【0062】図13(b)、13(c)に示すような一連の複数のパルス光をそれぞれ含む2つの不連続プローブ光により測定される区間は、不連続ポンプ光の幅（例えば20ns）と不連続プローブ光に含まれる一連のパルス光が継続する所定の期間（20ns）とにより定まり、各微小区間 $z(i)$ の長さは上記の所定の時間間隔 $T_p$ により定まる（実際には、所望の空間分解能を得るために即ち各微小区間 $z(i)$ の長さを所望の長さに設定するために、所定の時間間隔 $T_p$ が決定される）。例えば、不連続ポンプ光の幅が20nsの場合、1つのプローブパルス光により一度に測定される区間は20nsの幅の不連続ポンプ光にプローブパルス光が出会いプローブパルス光の先端が不連続ポンプ光の末端とすれ違うまでに要する時間10nsに相当し、その長さは約2m（光速を約 $2 \times 10^8$  m/sとすると、約 $2 \times 10^8$  m/s  $\times 10 \times 10^{-9}$  s = 約2m）となる。

【0063】さらに、図13(b)、13(c)に示すように、各不連続プローブ光の各パルス光の幅は典型的には0.5nsであり、パルス光のパルス繰り返し周期は一定で典型的には1nsである。そして、プローブ光源4は、図13(b)に示すような一連の複数のパルス光から成る不連続プローブ光を最初に入射し、さらに、



25

(14)

図13(c)に示すような、図13(b)の不連続プローブ光に対して0.5 nsだけ遅延させたものを光ファイバ2中へ入射する。この場合、各微小区間の長さは約5 cm (光速を約 $2 \times 10^8$  m/sとすると、 $2 \times 10^8$  m/s  $\times$  0.25  $\times 10^{-9}$  s = 0.05 m)となる。従って、不連続プローブ光の各パルスにより測定される区間に含まれる微小区間の数は40 (= 2 m / 0.05 m)となる。また、図13(b)又は13(c)に示すような同一の不連続プローブ光に含まれる各パルス光により測定される区間は、以下で示すように、その前のパルス光により測定される区間に対して微小区間2つ分プローブ光源4側へずれたものとなる。

【0064】また、図13(a)に示すような上記実施の形態1〜2で使用する単発の不連続プローブ光の波形を、Tpのパルス幅の各パルス光を1に対応させてTpの継続時間のパルス光が無いところを0に対応させてコードで示すと、「1111...」と表すことができる。この際、この実施の形態3で使用する図13

(b)に示す不連続プローブ光は「1010...」のコードで表すことができ、図13(c)に示す図13

(b)の不連続プローブ光と対をなす他の不連続プローブ光は「0101...」のコードで表すことができる。なお、この実施の形態3の測定装置のこれ以外の構成は実施の形態2によるものと同様なので説明を省略する。

【0065】次に動作について説明する。光ファイバ2の測定区間の歪み分布の測定のために、プローブ光源4は、まず、制御手段20による制御のもとで図13

(b)に示すような一連の複数のパルス光を含む1つの不連続プローブ光を光ファイバ2へ入射する。式17はこの実施の形態3の利得係数演算ステップST11において使用される利得演算行列式である。同式に示すように、プローブ光は、微小区間z(i)の長さを決定する繰り返し周期を有する一連の複数のパルス光として所定\*

特開2000-74697

26

\*の期間の間だけ入射されるので、各プローブパルス光に関するブリルアン散乱光に寄与する複数の微小区間は、その前後のいずれのプローブパルス光に関するブリルアン散乱光に寄与する複数の微小区間とは2区間分ずつずれる。例えば、1つのパルス光により同時に測定される連続する複数の微小区間が $z(i)$ 、 $z(i+1)$ 、...、 $z(i+n-1)$ であるとき、次のパルス光により同様に測定される連続する複数の微小区間は $z(i+2)$ 、 $z(i+3)$ 、...、 $z(i+n+1)$ となる(図6参照)。図14(a)に示すような、一連の複数のパルス光により生じるブリルアン散乱光の光強度データ $Ps(t_1, 0)$ 、 $Ps(t_2, 0)$ 、 $Ps(t_3, 0)$ 、...から、変数 $Qs(1)$ 、 $Qs(3)$ 、 $Qs(5)$ 、...が得られる。さらに、プローブ光源4は、変数 $Qs(2)$ 、 $Qs(4)$ 、 $Qs(6)$ 、...を得るために、同一の設定周波数 $\nu_s$ を有しており、図13(c)に示すような、図13(b)に示した一連の複数のパルス光を0.5 nsだけ遅延させたものを制御手段20による制御のもとで光ファイバ2へ入射し、図14(b)に示すような、この遅延された一連の複数のパルス光により生じるブリルアン散乱光の光強度データ $Ps(t_2, 0)$ 、 $Ps(t_4, 0)$ 、 $Ps(t_6, 0)$ 、...を得る。なお、図14(a)、(b)に示すような光強度データを得るためには、光強度検出器5では、4〜5 GHzのサンプリングレートでブリルアン散乱光強度をサンプリングして複数の光強度データを得る。そして、サンプリングした光強度データに基づき最小自乗法等を用いて図14(a)、14(b)に示すような波形を求め、この波形から光強度データ $Ps(t_1, 0)$ 等を得ている。これ以外の動作は実施の形態2と同様なので説明を省略する。

【0066】

【数17】

$$\begin{pmatrix} a(1,1) & a(1,2) & a(1,3) & \cdots & a(1,n) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & a(3,3) & a(3,4) & \cdots & a(3,n+1) & a(3,n+2) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a(5,5) & \cdots & a(5,n+3) & a(5,n+4) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots & & & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & a(m-1,n-1) & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & a(m-1,n+m-2) & 0 \\ 0 & a(2,2) & a(2,3) & \cdots & a(2,n) & a(2,n+1) & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a(4,4) & a(4,5) & \cdots & a(4,n+2) & a(4,n+3) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(6,6) & \cdots & a(6,n+4) & a(6,n+5) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots & & & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & a(m,m) & \cdots & \cdots & a(m,n+m-1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g_s(1) \\ g_s(2) \\ g_s(3) \\ \vdots \\ g_s(m) \\ \vdots \\ g_s(n+m-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_s(1,1) \\ Q_s(1,3) \\ Q_s(1,5) \\ \vdots \\ Q_s(1,m-1) \\ Q_s(2,2) \\ \vdots \\ Q_s(2,m) \end{pmatrix}$$

……式17



(15)

特開2000-74697

27

【0067】以上のように、この実施の形態3によれば、各不連続プローブ光の隣接する2つの異なるパルス光により測定される2組の複数の微小区間は互いに2つずつずれているので、不連続プローブ光として所定の継続時間を有する単パルスを使用した場合に問題となる、隣接する微小区間同士において発生したブリルアン散乱光同士の干渉による誤差が生じ難くなり、一度に計測される光強度データによって決まる変数 $Q_s(i)$ に含まれる誤差を削減することができる効果がある。従って、この実施の形態3では、ブリルアン散乱光を用いて被測定物1の微小区間毎の歪みをより正確に測定することができる。

【0068】なお、この実施の形態3では、ブリルアン散乱光を用いて被測定物1の微小区間毎の歪みを測定する例を説明したが、同様の手法により、構造物1のひずみ変化がない場合における構造物1の温度変化とブリルアン散乱光の周波数シフトとの関係を利用して被測定物1の微小区間毎の温度を測定することができる。なお、構造物1の温度変化とラマン散乱光の強度との関係を利用して、同様の手法により被測定物1の微小区間毎の温度を測定することができる。

【0069】また、上記実施の形態3では、測定区間の歪み分布測定のために、図13(b)、13(c)に示したような1組の2つの異なる不連続プローブ光を用いたが、図13(b)に示すような1つの不連続プローブ光のみを用いてもよい。この際、空間分解能はこの実施の形態3の場合の1/2に減少する。即ち、各微小区間の長さは上記実施の形態3の場合の2倍となる。また、この場合、 $n$ は偶数であることが望ましい。

【0070】実施の形態4。図15はこの発明の実施の形態4による測定装置で使用される不連続プローブ光の波形を示す図である。同図に示すように、上記実施の形態3と同様に、各不連続プローブ光は、光ファイバ2の測定区間を等分割した、図6(a)に示すような各微小区間 $z(i)$ の長さの2倍に相当する所定の時間間隔 $T_p$ （これは上記実施の形態2における所定の有効サンプリング周期 $T_s$ に相当している）単位に、所定の継続時間即ち幅を有する単パルスを分割して得られる一連の複数のパルス光から成る。しかしながら、上記実施の形態3とは異なり、各不連続プローブ光のパルス繰り返し周期は必ずしも $2T_p$ で固定ではなく、所定のコードに対応したものである。即ち、各不連続プローブ光は、所定のコードに対応した必ずしも一定ではない周期の一連のパルス光から成る。継続時間 $T_p$ のパルス光が有るところを1に対応させ、 $T_p$ のパルス光の無いところを0に対応させた場合、図15(a)に示した例の不連続プローブ光は、「10001000...」という所定のコードに対応しており、この場合はパルス光の繰り返し周期は一定で $4T_p$ である。また、図15(b)に示す例の不連続プローブ光は、「01000010...」と

28

いう所定のコードに対応しており、この場合はパルス光の繰り返し周期は一定ではない。図15(c)に示す例の不連続プローブ光は、「00100100...」という所定のコードに対応しており、この場合はパルス光の繰り返し周期は一定ではない。図15(d)に示す例の不連続プローブ光は、「00010001...」という所定のコードに対応しており、この場合はパルス光の繰り返し周期は一定で $4T_p$ である。なお、図15(a)～15(d)に示す1組の4つの不連続プローブ光を重ね合わせると、全ビットが1（ここでは $T_p$ 毎の部分ここではビットと称する）のコード「11111111...」となる。このように、この実施の形態4による測定装置は、所定の区間に対して、図15(a)～15(d)に示すような4つの異なる所定のコードに対応する4つの異なる不連続プローブ光を用いて計測を実施する。なお、1組に含まれる不連続プローブ光の数は4に限定されるものではなく、2つ以上であり且つ複数の不連続プローブ光の区別が容易にできるならばどのようなパルス列の組み合わせであってもよい。さらに、この際、不連続プローブ光として所定の継続時間即ち幅を有する単パルスを使用した場合に問題となる、隣接する微小区間同士に関するブリルアン散乱光同士の干渉による誤差を削減するために、部分的に「11」とならないように、各コードを設定することが好ましいが、干渉を補正することも可能であるので、各不連続プローブ光のコードは、部分的に「11」等の2つ以上の「1」が連続する部分を含んでいてもよい。これ以外の構成は実施の形態3の測定装置と同様なので説明を省略する。

【0071】次に動作について説明する。式18はこの実施の形態4の利得係数演算ステップS11において使用される利得演算行列式である。光ファイバ2の測定区間の歪み分布の測定のために、プローブ光源4は、まず、図15(a)に示すような所定のコード「10001000...」に対応した、一連の複数のパルス光を含む1つの不連続プローブ光を制御手段20による制御のもとで光ファイバ2へ入射する。この際、式18に示すように、各プローブパルス光に関するブリルアン散乱光に寄与する複数の微小区間は、その前後のパルス光のいずれかに関するブリルアン散乱光に寄与する複数の微小区間と互いに4区間分ずつずれる。例えば、1つのパルス光により同時に計測される連続した複数の微小区間が「 $z(i)$ 、 $z(i+1)$ 、...、 $z(i+n-1)$ 」であるとき、次のパルス光により同時に計測される連続した複数の微小区間は「 $z(i+4)$ 、 $z(i+5)$ 、...、 $z(i+n+3)$ 」となる。この結果、図16(a)に示すように、一連の複数のパルス光により生成されるブリルアン散乱光の測定された光強度 $P_s(t_1, 0)$ 、 $P_s(t_2, 0)$ 、 $P_s(t_3, 0)$ 、... から、変数 $Q_s(1)$ 、 $Q_s(5)$ 、 $Q_s(9)$ 、... が得られる。さらに、プローブ光源4

(15)

特開2000-74697

29

30

は、変数 $Q_s(2) \sim Q_s(4)$ ,  $Q_s(6) \sim Q_s(8) \dots$ を得るために、同一の設定周波数 $\nu_s$ を有しており、例えば、所定のコード「01000010...」に対応した、一連の複数のパルス光を含む不連続プローブ光を制御手段20による制御のもとで光ファイバ2へ入射して図16(b)に示すような光強度 $P_s(t_2, 0)$ ,  $P_s(t_4, 0)$ ,  $P_s(t_6, 0) \dots$ を得、さらに、同一の設定周波数 $\nu_s$ を有しており、所定のコード「00100100...」に対応した一連の複数のパルス光を含む不連続プローブ光10を光ファイバ2へ入射して図16(c)に示すような光\*

\*強度 $P_s(t_1, 0)$ ,  $P_s(t_3, 0)$ ,  $P_s(t_5, 0) \dots$ を得、最後に、同一の設定周波数 $\nu_s$ を有しており、所定のコード「00010001...」に対応した一連の複数のパルス光を含む不連続プローブ光を光ファイバ2へ入射して図16(d)に示すような光強度 $P_s(t_1, 0)$ ,  $P_s(t_3, 0)$ ,  $P_s(t_5, 0)$ ,  $P_s(t_7, 0) \dots$ を得る。これ以外の動作は実施の形態3と同様なので説明を省略する。

【0072】

【数18】

$$\begin{array}{c}
 a(1,1) \dots \dots \dots a(1,n) 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \dots \dots \dots 0 \\
 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ a(5,5) \dots \dots \dots a(5,n+4) \ 0 \dots \dots \dots 0 \\
 \vdots \dots \dots \vdots \\
 0 \dots \dots \dots 0 \ a(m-3,m-3) \dots \dots \dots a(m-3,m+n-4) \ 0 \ 0 \ 0 \\
 0 \ a(2,2) \dots \dots \dots a(2,n+1) 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \dots \dots \dots 0 \\
 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ a(6,6) \dots \dots \dots a(6,n+5) \ 0 \dots \dots \dots 0 \\
 \vdots \dots \dots \vdots \\
 0 \dots \dots \dots 0 \ a(m-2,m-2) \dots \dots \dots a(m-2,m+n-3) \ 0 \ 0 \\
 0 \ 0 \ a(3,3) \dots \dots \dots a(3,n+2) 0 \ 0 \ 0 \ 0 \dots \dots \dots 0 \\
 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ a(7,7) \dots \dots \dots a(7,n+6) \ 0 \dots \dots \dots 0 \\
 \vdots \dots \dots \vdots \\
 0 \dots \dots \dots 0 \ 0 \ a(m-1,m-1) \dots \dots \dots a(m-1,m+n-2) \ 0 \\
 0 \ 0 \ 0 \ a(4,4) \dots \dots \dots a(4,n+3) 0 \ 0 \ 0 \ 0 \dots \dots \dots 0 \\
 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ a(8,8) \dots \dots \dots a(8,n+7) \ 0 \dots \dots \dots 0 \\
 \vdots \dots \dots \vdots \\
 0 \dots \dots \dots 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ a(m,m) \dots \dots \dots a(m,n+m-1)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 g_s(1) \quad Q_s(1,1) \\
 g_s(2) \quad Q_s(1,5) \\
 \vdots \quad \vdots \\
 Q_s(1,m-3) \\
 Q_s(2,2) \\
 \vdots \quad \vdots \\
 Q_s(2,6) \\
 \vdots \quad \vdots \\
 Q_s(2,m-2) \\
 Q_s(3,3) \\
 \vdots \quad \vdots \\
 Q_s(3,m-1) \\
 Q_s(4,4) \\
 \vdots \quad \vdots \\
 Q_s(4,m) \\
 g_s(m) \\
 \vdots \\
 g_s(m+n-1)
 \end{array}
 \quad \text{式18}$$

ここでmは偶数

【0073】なお、上記したように、コードパターンは図15に示したものに限られるものではなく、例えば、最終的に不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ 毎に得られた $m$ 個の光強度データによって決まる $m$ 個の変数 $Q_s(1) \sim Q_s(m)$ が得られるように、複数の所定のコードを加算したときに全ビットが1となるように複数のコードパターンを設定すれば良い。なお、この際、不連続プローブ光として所定の継続時間即ち幅を有する単パルスを使用した場合に問題となる、隣接する微小区間同士に関するブリルアン散乱光同士の干渉による誤差を削減するために、部分的に「11」とならないように、各コードを設定することが好ましいが、干渉を考慮して修正することも可能であるので、部分的に「11」等の2つ以上「1」が連続してもよい。

【0074】図17は、この実施の形態4による測定装置の一変形例で使用される不連続プローブ光の波形を示す図である。この変形例による不連続プローブ光は、図に示すように、一定のパルス繰り返し周期 $T_p$ を有し、それぞれパルス幅 $T_w$ を有する一連のパルス光から成

る。図17に示す一連のパルス光は、全ビットが1のコード「11111111...」に対応する。このような不連続プローブ光を、一度に、光ファイバ2へ入射することも可能であるが、上記したように、複数のコードにそれぞれ対応した複数のパルス列に分割して、光ファイバ2へ入射してもよい。この変形例では、上記実施の形態4と同様に5cmの空間分解能を得るためには、 $T_p$ は0.5nsである必要がある。この際、光強度検出器5でのサンプリングレートは8GHz以上でなければならない。

【0075】以上のように、この実施の形態4によれば、図16(a)～16(d)に示すように、1つの不連続プローブ光に含まれる一連の複数のパルス光に関するブリルアン散乱光強度のデータ列と所定のコードとを対応づけることが可能となり、上記データ列が複数の微小区間のうちのいずれの複数のものに対応しているかを容易に判定することができる。即ち、各パルス光により測定される連続する複数の微小区間に関するブリルアン散乱光の測定された強度データによって決まる各変数が

(17)

特開2000-74697

31

光ファイバの測定区間上のどの位置に対応しているかを容易に判定することができる。従って、サンプリング順番や記憶順番などがランダムになってしまったとしても、散乱光の強度データによって決まる変数 $Q_s(i)$ を容易に管理し、利用することができる効果がある。従って、効率よくブリルアン散乱光を用いて被測定物1の微小区間毎の歪みを測定することができる。

【0076】なお、この実施の形態4では、ブリルアン散乱光を利用して被測定物1の微小区間毎の歪みを効率よく測定する例を説明したが、同様の手法により、構造物1のひずみ変化がない場合における構造物1の温度変化とブリルアン散乱光の周波数シフトとの関係を用いて被測定物1の微小区間毎の温度を効率よく測定することができる。なお、構造物1の温度変化とラマン散乱光の強度との関係を利用して、同様の手法により被測定物1の微小区間毎の温度を効率よく測定することができる。

【0077】実施の形態5. 図18はこの発明の実施の形態5による測定装置を示すブロック図である。図において、17は光ファイバ2の被測定物1に固定されていない部位である参照ファイバ部であり、15は参照ファイバ部17の温度を測定する温度測定手段であり、検出した温度情報は演算手段8に入力される。これ以外の構成は上記実施の形態2～4のいずれかと同一であるので説明を省略する。なお、参照ファイバ部17は被測定物1に固定されていないので、歪みがゼロであると仮定することができる。

【0078】次に動作について説明する。図19はこの発明の実施の形態5による図7に示した演算ステップST27の詳細な演算処理手順を示す演算ステップサブフローチャートである。図において、ST15は温度測定手段15により得られた温度情報に基づいて、演算手段8が図6(a)に示した微小区間 $z(m+1) \sim z(m+n-1)$ に相当する部位である参照ファイバ部17の散乱利得係数 $\{g_s(m+1) \sim g_s(m+n-1)\}$ を演算する参照ファイバ利得係数演算ステップである。なお、参照ファイバ部17は微小区間 $z(1) \sim z(n-1)$ に相当する部位であって構造的に問題ない。この場合、参照ファイバ利得係数演算ステップST15では、参照ファイバ部17の散乱利得係数 $\{g_s(1) \sim g_s(n-1)\}$ が演算される。これ以外の動作は実施の形態2～4のいずれかのものと同様なので説明を省略する。

【0079】図20は光ファイバ2の温度とブリルアン散乱光の周波数シフトとの関係を示す温度特性図である。図において、横軸は温度、縦軸は周波数シフトである。そして、参照ファイバ利得係数演算ステップST15では、標準温度に対する温度変化量に対応させてブリルアン散乱光の基準中心周波数を補正する。

【0080】以上のように、この実施の形態5によれば、

32

参照ファイバ部17の温度を測定する温度測定手段15を設け、この測定温度により参照ファイバ部17の散乱利得係数 $\{g_s(m+1) \sim g_s(m+n-1)\}$ を補正するようにしたので、これらに基づき得られる各微小区間 $z(i)$ の散乱利得係数 $\{g_s(i) (i=1 \sim m)\}$ の誤差を削減することができる効果がある。

【0081】なお、この実施の形態5では、参照ファイバ部17を1箇所に設置した例を説明したが、2箇所以上に設置してもよい。特に、被測定物1の両端において隣接する位置にそれぞれ参照ファイバ部17を設置した場合には、参照ファイバ部17の微小区間と被測定物1の微小区間とが隣接することになって、これらを離間させた場合にその間に発生する余分な微小区間に関する測定や演算を行う必要がないので、最も効率よく計測することができる。

【0082】実施の形態6. この発明の実施の形態6による測定装置は周波数シフト及びパワーシフトあるいは散乱利得係数変化量に基づいて所定の区間又は各微小区間 $z(i)$ の歪み及び温度を演算するものであり、その構成は上記実施の形態5と同一なので説明を省略する。

【0083】次に動作について説明する。図21はこの発明の実施の形態6による図7に示す演算ステップST27の詳細な演算処理手順を示すフローチャートである。図において、ST16は、演算手段8が各微小区間 $z(i)$ に関する散乱光の中心周波数と光ファイバ2におけるブリルアン散乱光の標準的な基準中心周波数との周波数シフトとともに、基準中心周波数の散乱光強度に対する上記微小区間 $z(i)$ に関する散乱光の中心周波数の散乱光強度のパワーシフト又は散乱利得係数の変化量を演算する周波数シフト及びパワーシフト演算ステップであり、ST17は、演算手段8が微小区間 $z(i)$ の歪みとともに温度を演算する歪み及び温度演算ステップである。これ以外の動作は実施の形態5と同様であり説明を省略する。

【0084】図22はこの発明の実施の形態6による各微小区間 $z(i)$ に関するブリルアン散乱光強度のスペクトルを示すグラフである。同図において、 $\Delta\nu$ は周波数シフトを示し、 $\Delta P_s$ はパワーシフトあるいは散乱利得係数変化量を示す。これ以外の各符号は図3と同様であり説明を省略する。

【0085】式19はこの発明の実施の形態6において、周波数シフト $\Delta\nu$ 、及びパワーシフト又は利得係数変化量 $\Delta P_s$ に基づいて各微小区間 $z(i)$ の歪み $\Delta\epsilon$ 及び温度 $\Delta T$ を求める特性演算行列式である。同式において、 $P(R)$ はレーリー散乱光強度又は不連続ポンプ光強度、 $C_{\epsilon\nu}$ 、 $C_{\epsilon P}$ 、 $C_{T\nu}$ 、 $C_{TP}$ は光ファイバ2に固有の定数である。

【0086】

【数19】

(18)

特開2000-74697

33

34

$$\left( \frac{\Delta V}{\frac{\Delta P_s}{P_s}} \right) = \begin{pmatrix} C_{EV} & C_{TV} \\ C_{EP} & C_{TP} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad \cdots \text{式 19}$$

【0087】以上のように、この実施の形態6によれば、演算手段8において周波数シフト及びパワースhiftあるいは散乱利得係数変化量に基づいて各微小区間2(i)の歪み及び温度を演算するようにしたので、ブリルアン散乱光を用いて各微小区間2(i)の歪みと温度とを同時に測定することができる効果がある。

【0088】実施の形態7. 図23はこの発明の実施の形態7による測定装置を示すブロック図である。図において、16は光ファイバ2の他端に配設された反射部材である。なお、光ファイバ2の自由端が反射部材16の代わりとなり得るので、反射部材16を設けなくても構わない。これ以外の構成は上記実施の形態1～6のうちのいずれかと同様なので説明を省略する。なお、この実施の形態7では、好ましくは、参照ファイバ部17は図23に示すように2(1)～2(n-1)に相当する部位である。

【0089】次に動作について説明する。以下では、図20に示したフローチャートを参照して、上記実施の形態\*

\*1～6による測定装置の動作と異なる点についてのみ説明する。ステップST2において、制御手段20の制御のもとでプローブ光源4が光ファイバ2へ不連続プローブ光を入射した後、ステップST3において、制御手段20はポンプ光源3を制御して光ファイバ2の構造物1に固定された測定区間の所定の区間の反射部材16側の端部において反射部材16で反射した不連続プローブ光と不連続ポンプ光とが出会うように、不連続ポンプ光を光ファイバ2へ入射する。その後、上記実施の形態1～実施の形態6のいずれかによる測定装置と同様に、ステップST4～ST6を実行する。

【0090】次に、上記実施の形態2と同様に、ステップST7の演算ステップにおいて上記式13に基づいて各微小区間2(i) (i=n-m+1～n-1)の散乱利得係数 $g_s(i)$ を演算する前に、下記式20に従って変数 $Q_s(i)$ を計算することができる。

【0091】

[数20]

$$Q_s(i) = \ln \left\{ \frac{P_s(t, 0)}{P_s(t - \frac{2L}{c}, 0)} \right\} + 2\alpha L + R \quad \cdots \text{式 20}$$

【0092】なお、 $P_s(t, 0)$ は $Z=0$ の位置で測定された実際のブリルアン散乱光強度即ちプローブ光強度であり、 $P_s(t - 2L/c, 0)$ は $Z=0$ の位置で時刻 $(t - 2L/c)$ に測定されたプローブ光強度、 $\alpha$ はプローブ光の減衰係数であり、 $L$ は光ファイバ2の全長であり、 $c$ は光ファイバ2中での不連続プローブ光の伝播速度であり、 $R$ は反射部材16の反射ロスである。

【0093】そして、この実施の形態7による測定装置の演算手段8は、 $Q_s(i)$ に上記式20に従って計算した値を代入し、各歪み率 $a(i, j)$ に上記式16により計算した値を上記式13と同様な利得演算行列式に代入し、温度測定手段15により測定された参照ファイバ部17の温度に基づき参照ファイバ部17の散乱利得係数 $g_s(1) \sim g_s(n-1)$ を演算したものを上記利得演算行列式に代入して、各微小区間2(i) (i=n-m+1～n-1)の散乱利得係数 $g_s(i)$ を演算することができる。

【0094】以上のように、この実施の形態7によれば、光ファイバ2の他端には光を反射する反射部材16を配設したので、光ファイバ2の一端にポンプ光源3とプローブ光源4とを設け、一端から2つの光を光ファイバ2へ入射することにより、散乱光の測定を行うことができる。特に、光ファイバ2両端間の距離が長い場合においても測定が可能となる。

【0095】実施の形態8. 図24はこの発明の実施の

形態8による測定装置を示すブロック図である。図において、1a～1cはそれぞれ光ファイバ2に対して互いに間隔を空けて固定された被測定物であり、17a～17cはそれぞれ光ファイバ2の被測定物1a～1cに固定されておらず且つ歪みが生じていない部位である参照ファイバであり、15はこれらのうちの1つの参照ファイバ17aの温度を測定する温度測定手段である。これ以外の構成は実施の形態7と同様であり説明を省略する。

【0096】次に動作について説明する。測定装置は、光ファイバ2上に設定された各測定区間(各被測定物1a～1cに固定された区間)について歪み及び温度の測定を行う。全ての被測定物1a～1cを一括して計測する場合には、例えば、散乱光の強度計測を光ファイバ2の全長に渡って行うとともに、温度測定手段15が所定の参照ファイバ17aの温度を測定し、演算手段8がこの温度が計測された参照ファイバ17aの部位から順番に微小区間毎の周波数シフト及び散乱利得係数変化量を演算し、これらに基づいて各微小区間の歪み及び温度を演算すればよい。

【0097】1つの被測定物を計測する場合や複数の被測定物をばらばらに計測する場合には、例えば、所定の被測定物の微小区間とともにその被測定物から隣接する参照ファイバまでの区間を測定するとともに、温度測定手段15が所定の参照ファイバ17aの温度を測定し、演算手段8がこの温度が計測された参照ファイバ17a

の部位の温度を参照しつつ、上記測定区間の参照ファイバから順番に微小区間毎の周波数シフト及び利得係数変化量を演算し、これらに基づいて歪み及び温度を演算すればよい。なお、これらの演算方法から明らかなように、参照ファイバ17a~17cは各被測定物1a~1cに隣接する位置に配設した場合に最も効率よく歪み及び温度を演算することができる。また、温度計測手段は各参照ファイバ17a~17cに対応させて配設してもよい。

【0098】以上のように、この実施の形態8によれば、光ファイバ2は複数の被測定物1a~1cに固定されているので、光ファイバ2を複数の被測定物1a~1cに固定してそのケーブル長を有効に利用して測定を行うことができる。また、参照ファイバ17a~17c自体の温度を測定して、これに基づいて各被測定物1a~1cの散乱利得係数 $g_s(m+1) \sim g_s(m+n-1)$ を適正演算しているため、単に計測されたブリルアン散乱光強度データから得られる利得係数に基づいて歪みや温度を演算する場合に比べて、より正確な歪みや温度を得ることができる。

【0099】なお、この実施の形態8では、複数の被測定物1a~1cを1つの光ファイバ2で測定する例として説明したが、ほかに、被測定物1a~1cを複数の測定区間に分けて各測定区間毎に参照ファイバを設ける構成とすることにより、1つの被測定物を複数の測定区間に分割して測定することも同様に可能である。

【0100】

【発明の効果】以上のように、この発明によれば、被測定物に固定される光ファイバへ不連続ポンプ光を入射するとともに、上記光ファイバへ不連続プローブ光を入射し、これら2つの光の相互作用により生じた散乱光強度を光強度検出器が検出するので、この散乱光強度に基づいて演算手段は光ファイバの測定区間内の所定の区間の歪み及び/又は温度を演算することができる効果がある。特に、従来の測定装置と異なり、プローブ光として不連続プローブ光を利用しているため、光強度検出器における計測の時間間隔を短くすることで、従来の測定装置よりも細かい空間分解能にて歪み及び/又は温度を測定することができる効果がある。

【0101】この発明によれば、光強度検出器が、所定の区間を等分割して得られる複数の微小区間の各長さの2倍に相当する所定の時間間隔で散乱光の光強度を計測するので、従来の測定装置よりも細かい空間分解能にて歪み及び/又は温度を測定することができる効果がある。

【0102】この発明によれば、光ファイバの測定区間は $m$ 個の微小区間に等分割し、ポンプ光源は各微小区間の長さの2倍に相当する所定の時間間隔の $n$ 倍に相当する継続時間即ち幅を有する不連続ポンプ光を上記光ファイバへ入射し、演算手段は、上記所定の時間間隔で光強

度検出器で検出された、不連続プローブ光の設定周波数 $\nu_s$ における散乱光強度から上記式13に基づいて上記各微小区間の散乱利得係数を演算し、この散乱利得係数に基づいて上記各微小区間からの散乱光の周波数シフトを演算し、更に、散乱光の周波数シフト及び/又は散乱光強度に基づき上記各微小区間の歪み及び/又は温度を演算するので、従来の測定装置よりも細かい空間分解能にて歪み及び/又は温度を演算することができる効果がある。

【0103】この発明によれば、プローブ光源が、設定周波数毎に、各微小区間の長さの2倍に相当する所定の時間間隔を単位に所定の継続時間即ち幅を有する不連続光を分割して得られる、それぞれ一連の複数のパルス光から成る、少なくとも2つの不連続プローブ光のそれぞれと不連続ポンプ光とを光ファイバの所定の場所で重なるように制御手段による制御のもとで順次上記光ファイバに入射し、演算手段が、光強度検出器により検出された光強度から上記式13に基づいて上記各微小区間の散乱利得係数を演算し、この散乱利得係数に基づいて上記各微小区間からの散乱光の周波数シフトを演算し、更に、散乱光の周波数シフト及び/又は散乱光強度に基づき上記各微小区間の歪み及び/又は温度を演算するので、従来の測定装置よりも細かい空間分解能にて各微小区間の歪み及び/又は温度を演算することができる効果がある。さらに、プローブ光として継続時間内で連続した光を使用した場合に問題となる、隣接する微小区間同士のブリルアン散乱光同士の干渉による誤差が生じ難くなり、複数の強度データによって決まる変数に含まれる誤差を削減することができる効果がある。

【0104】この発明によれば、プローブ光源が、設定周波数毎に、所定の時間間隔に等しい所定のパルス繰り返し周期を有する一連の複数のパルス光を上記光ファイバに入射する。又は、この一連の複数のパルス光を分割して得られる、それぞれ一連の複数のパルス光から成る、少なくとも2つの不連続プローブ光をそれぞれそれに対応した不連続ポンプ光と上記光ファイバの所定の場所で重なるように制御手段による制御のもとで順次上記光ファイバに入射し、演算手段が、光強度検出器により検出された光強度から上記式13に基づいて上記各微小区間からの散乱光の散乱利得係数を演算し、この散乱利得係数に基づいて上記各微小区間からの散乱光の周波数シフトを演算し、更に、この周波数シフトの値に応じて上記各微小区間の歪み及び/又は温度を演算するので、この各微小区間からの散乱光の散乱利得係数に基づいて各微小区間の歪み及び/又は温度を演算することができる効果がある。さらに、プローブ光として継続時間内で連続した光を使用した場合に問題となる、隣接する微小区間同士のブリルアン散乱光同士の干渉による誤差が生じ難くなり、複数の強度データによって決まる変数に含まれる誤差を削減することができる効果がある。

(20)

特開2000-74697

37

38

【0105】この発明によれば、各不連続プローブ光に含まれる複数のパルス光は、一定の繰返し周期を有しているため、プローブ光として継続時間内で連続した光を使用した場合に問題となる、隣接する微小区間同士のブリルアン散乱光同士の干渉による誤差が生じ難くなり、複数の強度データによって決まる変数に含まれる誤差を削減することができる効果がある。

【0106】この発明によれば、各不連続プローブ光に含まれる複数のパルス光は、所定のコードに対応した必ずしも一定ではない周期で断続的に迫るものであるため、複数のパルス光により測定された散乱光の光強度のデータ列と上記所定のコードとを対応づけることが可能となり、上記データ列が複数の微小区間のうちのいずれの複数のものに対応しているかを容易に判定することができる効果がある。即ち、不連続プローブ光に含まれる各パルス光による連続する複数の微小区間に関する散乱光が光強度検出器に入射することにより測定される強度データによって決まる各変数が光ファイバの測定区間上のどの位置に対応しているかを容易に判定することができる効果がある。

【0107】この発明によれば、ポンプ光源が光ファイバの一端から不連続ポンプ光を入射し、プローブ光源が上記光ファイバの他端から不連続プローブ光を入射し、光強度検出器が上記光ファイバの上記一端から出力される出力光の光強度を検出し、演算手段は、上記式15に従って、不連続プローブ光の光ファイバ中での減衰量を加算して、変数 $Qs(i)$ を求めるようにしたので、不連続プローブ光の光ファイバ中での減衰に伴う上記光強度の減衰を補正することができ、各微小区間に関する散乱光の光強度に近い値を有する $Qs(i)$ を用いて各微小区間の歪み及び/又は温度を演算することができる効果がある。

【0108】この発明によれば、光ファイバの被測定物に固定されていない部位である参照ファイバの温度を測定する温度測定手段を備え、演算手段が、上記測定温度に応じて $gs(m+1)$ から $gs(m+n-1)$ （又は $gs(1)$ から $gs(n-1)$ ）までの散乱利得係数を演算した後、上記式13に基づいて上記各微小区間からの散乱光の散乱利得係数を演算するので、この $gs(m+1)$ から $gs(m+n-1)$ （又は $gs(1)$ から $gs(n-1)$ ）までの散乱利得係数に光ファイバの標準値を代入した場合に比べて、演算に用いる上記利得係数をより測定時の実際の利得係数に近いものとしてすることができ、ひいては各微小区間からの散乱光の散乱利得係数に基づいて演算される各微小区間の歪み及び/又は温度の誤差を削減することかできる効果がある。

【0109】この発明によれば、演算手段が、上記式16に基づいて各微小区間の歪み率を演算した後、上記式13に基づいて上記各微小区間の散乱利得係数を演算するので、不連続ポンプ光の波形なまりや伝播に伴う減衰

量を考慮して測定状態に近い歪み率に基づいて各微小区間の歪みや温度を演算することができ、ひいては各微小区間の歪み率に基づいて演算される各微小区間の歪み及び/又は温度の誤差を削減することかできる効果がある。

【0110】この発明によれば、演算手段が、上記式19に基づいて該微小区間の歪み及び温度を演算するので、1回の測定にて各微小区間の歪みと温度とを同時に得ることができる効果がある。

【0111】この発明によれば、反射部材が光ファイバの他端に設けられており、ポンプ光源が光ファイバの一端から不連続ポンプ光を入射し、プローブ光源が上記光ファイバの上記一端から不連続プローブ光を入射し、光強度検出器が上記光ファイバの上記一端から出力される出力光の光強度を検出するので、光ファイバの一端に設けられたポンプ光源及びプローブ光源から光ファイバへそれぞれポンプ光及びプローブ光を入射することにより、散乱光の測定を行うことができる効果がある。特に、光ファイバの全長が長くなるような場合において、プローブ光源とポンプ光源とのタイミング制御が難しくなってしまうような場合においても測定が可能となる効果がある。

【0112】この発明によれば、光ファイバは1つ又は複数の被測定物に固定されているため、光ファイバを複数の被測定物に固定してそのケーブル長を有効に利用しつつ、必要に応じて特定の測定区間のみを測定することにより、効率よく測定処理を実行することができる効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】 この発明の実施の形態1による測定装置を示すブロック図である。

【図2】 この発明の実施の形態1による測定装置の動作を示すフローチャートである。

【図3】 この発明の実施の形態1による各微小区間において発生したブリルアン散乱光強度（利得係数）のスペクトルを示すグラフである。

【図4】 この発明の実施の形態1による演算ステップの詳細な演算処理手順を示す演算ステップサブフローチャートである。

【図5】 この発明の実施の形態1による予め判っている周波数シフトと歪みとの特性関係を示す特性図である。

【図6】 この発明の実施の形態2による光ファイバに対する微小区間の設定を示す説明図である。

【図7】 この発明の実施の形態2による測定装置の動作を示すフローチャートである。

【図8】 この発明の実施の形態2による演算ステップの詳細な演算処理手順を示す演算ステップサブフローチャートである。

【図9】 この発明の実施の形態2における光強度検出

(21)

特開2000-74697

39

40

器5で測定されるブリルアン散乱光の強度を示すグラフである。

【図10】 この発明の実施の形態2における式12の各変数の関係を説明するための変数説明図である。

【図11】 光ファイバ内の光の伝播特性を示す説明図である。

【図12】 この発明の実施の形態2において光ファイバに入射するポンプ光の波形を示す波形図である。

【図13】 この発明の実施の形態3において使用する不連続プローブ光の波形を示す図である。

【図14】 この発明の実施の形態3における光強度検出器5で測定されるブリルアン散乱光の強度を示すグラフである。

【図15】 この発明の実施の形態4において使用する不連続プローブ光の波形を示す図である。

【図16】 この発明の実施の形態4における光強度検出器5で測定されるブリルアン散乱光の強度を示すグラフである。

【図17】 この発明の実施の形態4の一変形例において使用する不連続プローブ光の波形を示す図である。

【図18】 この発明の実施の形態5による測定装置を示すブロック図である。

\*【図19】 この発明の実施の形態5による演算ステップの詳細な演算処理手順を示す演算ステップサブフローチャートである。

【図20】 光ファイバの温度とブリルアン散乱光の周波数シフトとの関係を示す温度特性図である。

【図21】 この発明の実施の形態6による演算ステップの詳細な演算処理手順を示すフローチャートである。

【図22】 この発明の実施の形態6による各微小区間に関するブリルアン散乱光の強度のスペクトルを示すグラフである。

【図23】 この発明の実施の形態7による測定装置を示すブロック図である。

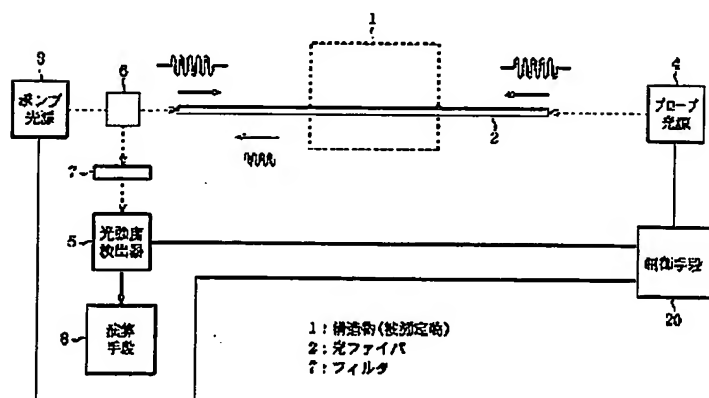
【図24】 この発明の実施の形態8による測定装置を示すブロック図である。

【図25】 従来の測定装置の構成を示すブロック図である。

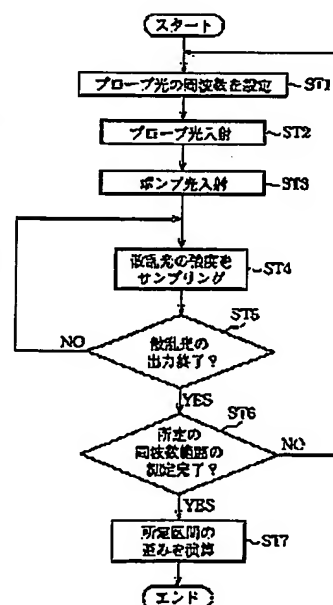
【符号の説明】

1、1a～1c 構造物(被測定物)、2 光ファイバ、3 ポンプ光源、4 プローブ光源、5 光強度検出器、7 フィルタ、8 演算手段、15 温度測定手段、16 反射部材、17 参照ファイバ部、20 制御手段。

【図1】

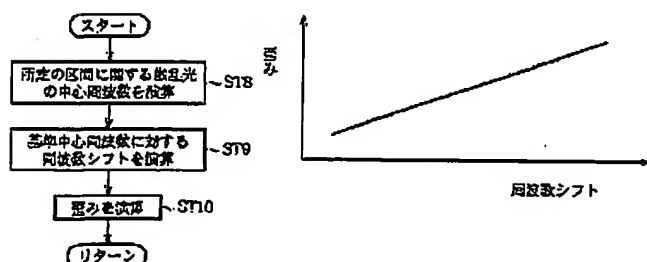


【図2】



【図4】

【図5】

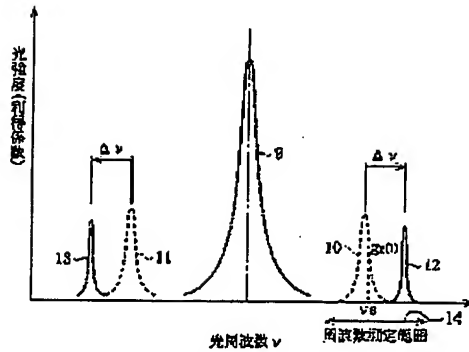




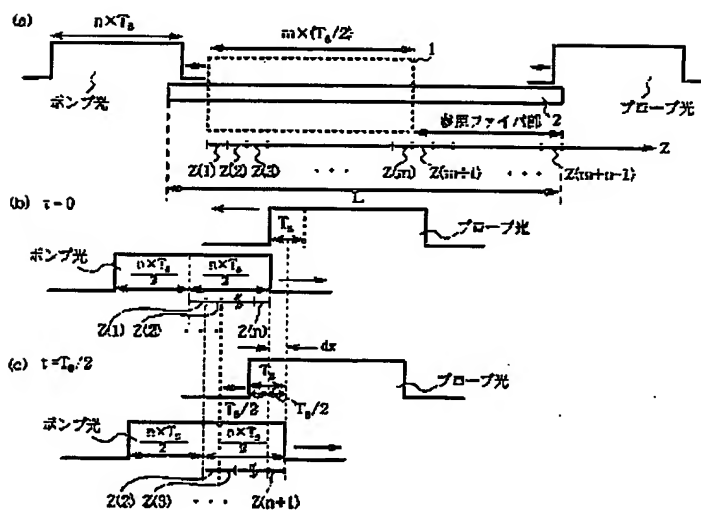
(22)

特開2000-74697

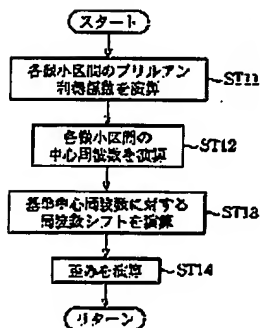
【図3】



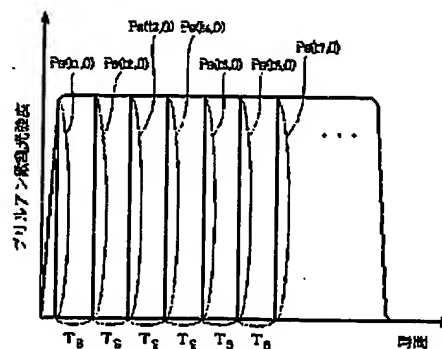
【図6】



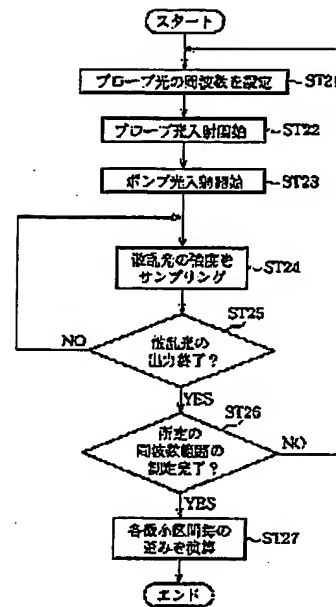
【図8】



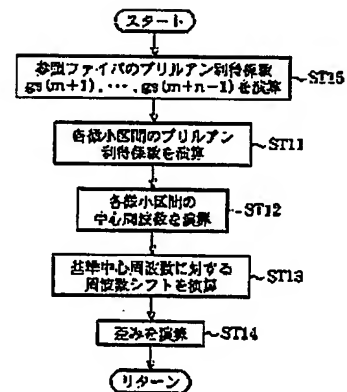
【図9】



【図7】



【図19】

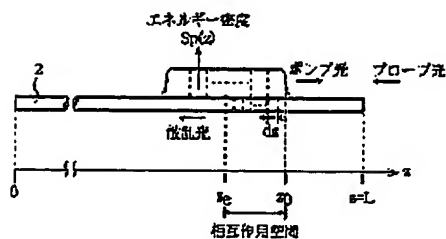




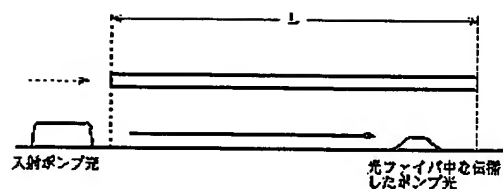
(23)

特開2000-74697

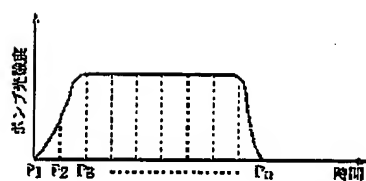
【圖 10】



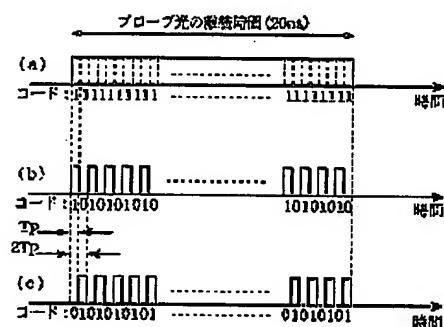
【圖 11】



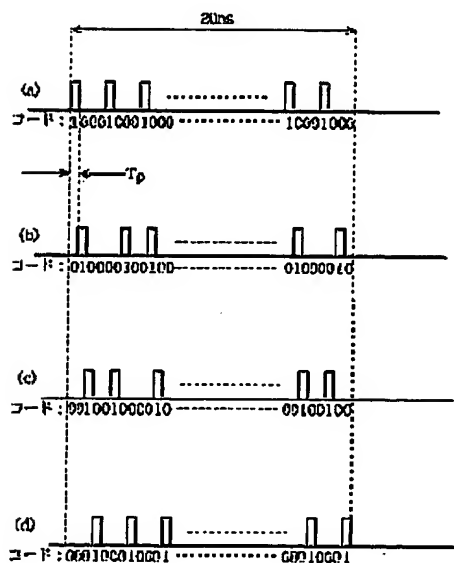
【圖 12】



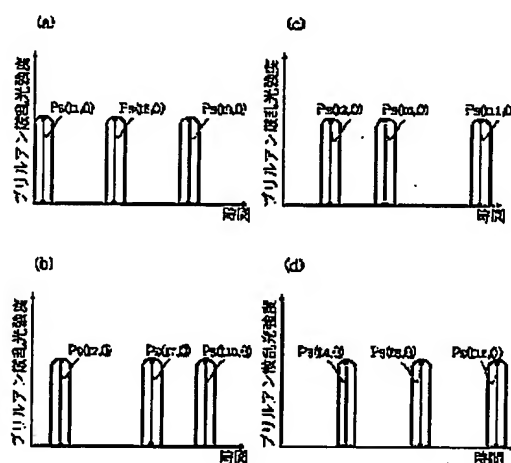
【圖 13】



【圖 15】

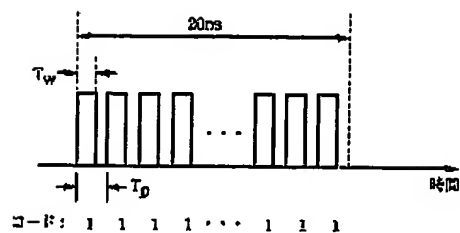


【图 16】

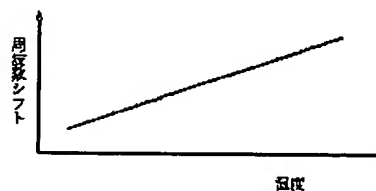


特開2000-74697

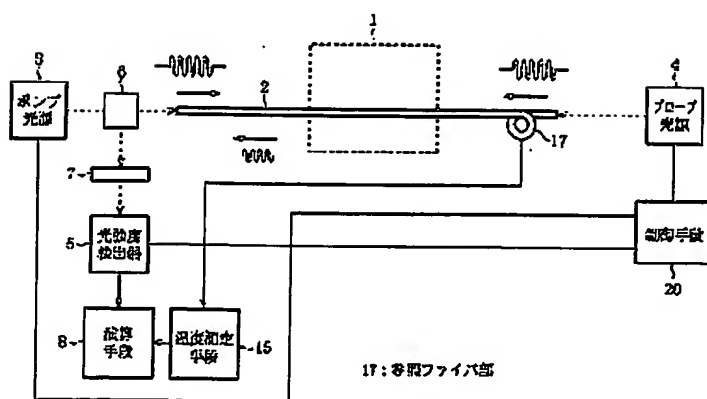
【圖 17】



【圖20】

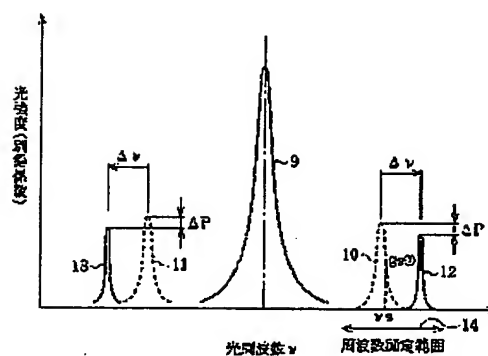


【图 18】

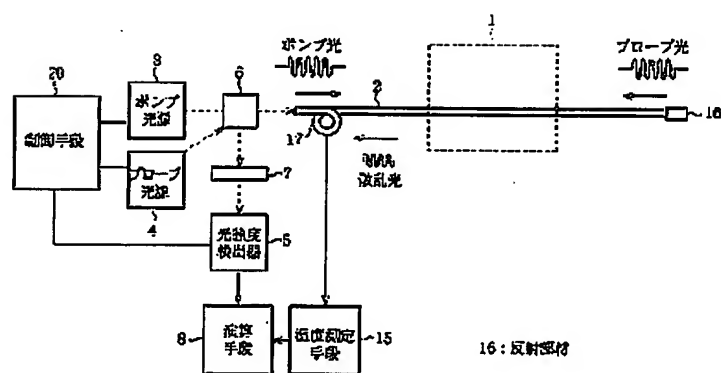


特開2000-74697

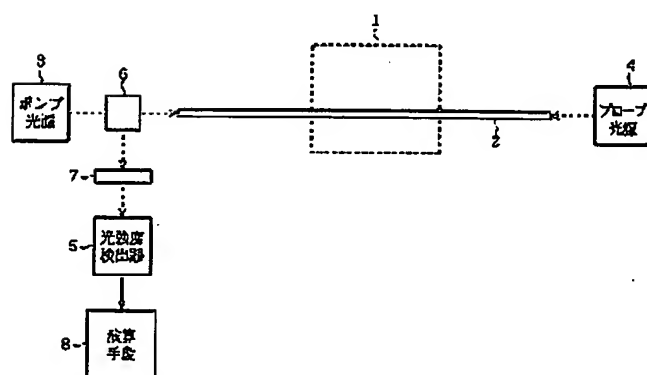
【圖22】



【圖23】



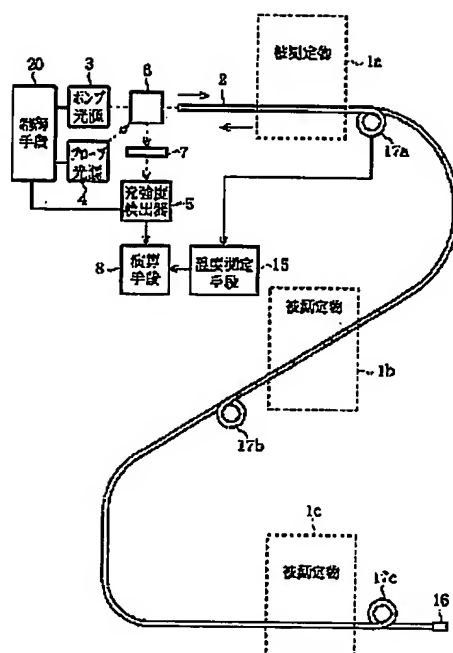
【圖25】



(26)

特開2000-74697

【圖24】



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**